

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



**EVALUACIÓN HIDRÁULICA DE LAS LÍNEAS DE EXTRACCIÓN DE  
CRUDO QUE ALIMENTA Y TRANSFIEREN LOS FLUIDOS DE LA  
ESTACIÓN DE FLUJO DEFO-2, DE LA U.P. DACIÓN,  
PDVSA-SAN TOMÉ, EDO. ANZOÁTEGUI**

**Realizado por:**

---

**Claudell Ernesto Bejarano Nuñez.**

**Asesores:**

---

**Prof. Johnny Martínez**

**Asesor Académico**

---

**Ing. Reinaldo González**

**Asesor Industrial**

**Puerto la Cruz, Noviembre 2009**

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



**EVALUACIÓN HIDRÁULICA DE LAS LÍNEAS DE EXTRACCIÓN DE  
CRUDO QUE ALIMENTA Y TRANSFIEREN LOS FLUIDOS DE LA  
ESTACIÓN DE FLUJO DEFO-2, DE LA U.P. DACIÓN,  
PDVSA-SAN TOMÉ, EDO. ANZOÁTEGUI**

**REALIZADO POR:**

**CLAUDELL ERNESTO BEJARANO NUÑEZ**

**C.I: 14.307.135**

**Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como  
requisito Parcial para optar al Título de INGENIERO MECÁNICO**

**Puerto la Cruz, Noviembre 2009**

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



**EVALUACIÓN HIDRÁULICA DE LAS LÍNEAS DE EXTRACCIÓN DE  
CRUDO QUE ALIMENTA Y TRANSFIEREN LOS FLUIDOS DE LA  
ESTACIÓN DE FLUJO DEFO-2, DE LA U.P. DACIÓN,  
PDVSA-SAN TOMÉ, EDO. ANZOÁTEGUI**

**JURADO**

**El Jurado hace constar que asignó a esta Tesis la calificación de:**

---

**Prof. Johnny Martínez**

**Asesor Académico**

---

**Prof. Lino Camargo**

**Jurado Principal**

---

**Prof. Melchor Ledezma**

**Jurado Principal**

**Puerto la Cruz, Noviembre 2009**

## **RESOLUCIÓN**

DE ACUERDO AL ARTÍCULO 44 DEL REGLAMENTO DEL TRABAJO DE GRADO: “LOS TRABAJOS DE GRADO SON DE EXCLUSIVA PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE Y SÓLO PODRÁN SER UTILIZADOS A OTROS FINES CON EL CONSENTIMIENTO DEL CONSEJO DE NÚCLEO RESPECTIVO, QUIEN LO PARTICIPARÁ AL CONSEJO UNIVERSITARIO”

## DEDICATORIA

A mi **Dios Padre Todopoderoso**, por haberme iluminado y guiado por el camino correcto para lograr vencer todos los obstáculos encontrados en lo que llevo de vida.

A mis padres **Claudio Bejarano y Olga Nuñez de Bejarano**, por darme toda esa dedicación especial para enseñarme a caminar en la vida, que nada fácil es, enseñándome los valores necesarios para lograr mis metas planteadas y confiar en mí en todo momento. Los AMO y QUIERO mucho.

A mi esposa y amiga **Leidys Regges de Bejarano**, por darme ese apoyo incondicional y ayudarme en todo momento, además de ser un constante impulso para que cumpliera esta meta que es la de graduarme de Ingeniero Mecánico. TE AMO tenlo siempre presente.

A mi hermana **Celia Bejarano**, por ser esa persona que admiro con mucho respeto y ser mi guía en lo profesional por todos sus logros alcanzados, además de enseñarme que todo es posible mientras se trabaje con esmero y dedicación.

A la Sra. **Cruz Guacarán** y demás personal administrativo que una u otra forma han contribuido a cristalizar esta meta. Gracias por todo.

## AGRADECIMIENTO

A Dios Todopoderoso, por iluminar mi sendero.

A mi familia, por todo su apoyo y confianza.

A mi amiga, novia y esposa, **Ing. Leidys Regges**, por ayudarme en todos los momentos difíciles cuando lo necesite en mi carrera universitaria.

A los **Ing. Fernando Resendiz y Reinaldo González**, a quienes le agradezco su paciencia, orientación y enseñanza para hacer posible el éxito alcanzado.

Al **Prof. Johnny Martínez**, por todas las asesorías académicas brindadas. Gracias por su paciencia y sus grandes consejos.

Al grupo de trabajo de la U.P Dación y de la Ingeniería de Procesos en San Tomé. Edo-Anzoátegui.

A todas aquellas personas que me brindaron su amistad y apoyo durante la etapa más importante de mi vida.

Eterno agradecimiento a la ilustre **Universidad de Oriente**, mi casa por siempre.

# INDICE

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| RESOLUCIÓN .....  | iv          |
| DEDICATORIA .....   | v           |
| AGRADECIMIENTO .....  | vi          |
| INDICE.....   | vii         |
| LISTADO DE FIGURAS .....  | xi          |
| LISTADO DE TABLAS.....  | xvi         |
| CAPÍTULO 1 .....  | 20          |
| EL PROBLEMA .....   | 20          |
| 1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO.....   | 20          |
| 1.2 RESEÑA HISTÓRICA .....  | 22          |
| 1.2.1 LÍNEAS DE EXTRACCIÓN DE CRUDO QUE ALIMENTAN LA<br>ESTACIÓN DE FLUJO DEFO-2 DE LA U.P DACIÓN ..... | 24          |
| 1.2.2 LÍNEA DE TRANSFERENCIA DESDE LA ESTACIÓN DEFO-2<br>HASTA LA ESTACIÓN PRINCIPAL DEPO .....         | 26          |
| 1.3 EL PROBLEMA .....   | 27          |
| 1.4 OBJETIVOS.....  | 28          |
| 1.4.1 General .....   | 28          |
| 1.4.2 Específicos .....   | 28          |
| CAPÍTULO 2 .....  | 30          |
| MARCO TEÓRICO.....  | 30          |
| 2.1 FENÓMENO DE ARENAMIENTO .....   | 30          |
| 2.2 MÉTODO PARA MEDIR EL CONTENIDO DE ARENA .....   | 33          |

|   |    |
|---|----|
| 2.3. EROSIÓN.....   | 34 |
| 2.3.1 Desgaste Erosivo .....  | 36 |
| 2.3.2 Factores que afectan la erosión por los hidrocarburos y aguas que transportan sólidos ..... | 38 |
| 2.4 MÉTODO PARA LA SEPARACIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO .....  | 41 |
| 2.5 TEORÍA DE LA SEDIMENTACIÓN CENTRÍFUGA .....   | 42 |
| 2.6 PATRONES Y RÉGIMENES DE FLUJO EN DOS FASES .....  | 45 |
| 2.7 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE UN SEPARADOR SÓLIDO-LÍQUIDO.....                               | 47 |
| 2.8 EQUIPOS DESARENADORES.....  | 49 |
| 2.8.1 Ciclón .....  | 49 |
| 2.8.1.1 Principio de funcionamiento del ciclón .....  | 51 |
| 2.8.1.2 Familia de ciclones .....   | 52 |
| 2.8.1.3 Cálculo de eficiencias .....  | 56 |
| 2.8.1.4 Factor de configuración "G" .....   | 58 |
| 2.8.1.5 Tiempo de relajación "T" .....  | 60 |
| 2.8.1.6 Exponente del vórtice "n" .....   | 60 |
| 2.8.1.7 Número de giros.....  | 61 |
| 2.8.1.8 Velocidad de saltación.....   | 63 |
| 2.8.1.9 Estimativa de la caída de presión.....  | 65 |
| 2.9 SEPARACIÓN DE LA ARENA .....  | 67 |
| 2.9.1 Principios de la separación de arena .....  | 68 |
| 2.9.1.1 Separación de la arena y el cabezal del pozo.....   | 69 |
| 2.9.1.2 Separación de arena en recipientes y tanques .....  | 70 |
| 2.9.1.3 Separación de la arena utilizando ciclones .....  | 71 |
| 2.9.2 Remoción de la arena de los recipientes y tuberías.....                                     | 72 |
| 2.9.2.1 Chorro de agua a presión .....  | 72 |
| 2.9.2.2 Remoción de sólidos de las tuberías y líneas de flujo .....                               | 75 |

|  |     |
|--|-----|
| 2.9.2.3 Métodos mecánicos para remoción de sólidos en tuberías .....   | 77  |
| 2.9.2.4 Diseño para remoción de sólidos en tuberías por medio de<br>sistemas de cochinos .....   | 77  |
| 2.9.3 Separación de sólidos en recipientes horizontales .....  | 80  |
| CAPÍTULO 3 .....   | 81  |
| METODOLOGÍA DE TRABAJO .....   | 81  |
| 3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....   | 82  |
| 3.2 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO Y DIMENSIONAL DEL CAMPO ..   | 83  |
| 3.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LOS FLUIDOS Y<br>ARENAS PRESENTES EN LAS CORRIENTES DE LOS FLUIDOS .....                                 | 86  |
| 3.4 ANÁLISIS DEL HISTORIAL DE FALLAS .....   | 89  |
| 3.5 ANÁLISIS HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE TUBERÍAS .....  | 91  |
| 3.5.1 Datos de entrada al Simulador PIPEPHASE 8.1 .....  | 91  |
| 3.5.2 Sistema de Recolección de Tuberías .....   | 92  |
| 3.5.3 Cálculo de las velocidades erosivas y máxima caída de presión del<br>sistema de recolección de fluidos .....                               | 93  |
| 3.6 DISEÑO DEL EQUIPO DE SUPERFICIE .....  | 95  |
| CAPÍTULO 4 .....   | 97  |
| ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....   | 97  |
| 4.1 SOLUCIÓN A CORTO PLAZO A LA PROBLEMÁTICA DE LA EROSIÓN<br>.....  | 97  |
| 4.1.1 Determinación de las velocidades de flujo y erosivas de las diferentes<br>tuberías en el sistema de recolección de fluidos de DEFO-2 ..... | 97  |
| 4.1.2 Primer Estudio Hidráulico .....  | 104 |
| 4.1.3 Segundo Estudio Hidráulico .....   | 118 |
| 4.1.4 Determinación de las velocidades erosivas en la línea de transferencia<br>DEPO (Estación Principal) .....                                  | 133 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.2. SOLUCIONES A MEDIANO Y LARGO PLAZO A LA PROBLEMÁTICA DE EROSIÓN, PRODUCTO DEL ARENAMIENTO .....                         | 136 |
| 4.2.1. Muestreo y caracterización de la arena y el fluido presente en el Campo de la Unidad de Producción Dación .....       | 136 |
| 4.2.2. Estudio de las diferentes tecnologías utilizadas en otros Distritos que permiten extraer la arena de superficie ..... | 137 |
| CAPÍTULO 5 .....   | 141 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....  | 141 |
| 5.1 CONCLUSIONES.....  | 141 |
| 5.2 RECOMENDACIONES .....  | 143 |
| BIBLIOGRAFÍA .....   | 146 |
| APÉNDICES.....   | 148 |
| METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:.....  | 149 |

## LISTADO DE FIGURAS

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Figura 1.1. Organigrama de la Gerencia Distrito Social San Tomé.....   | 21          |
| Figura 1.2. Ubicación geográfica del bloque de Dación en el Estado Anzoátegui..  | 22          |
| Figura 1.3. Organigrama de la Unidad de Producción Dación. ....  | 23          |
| Figura 1.4. Ubicación en detalle General de Estaciones DAC-3 y DEFO-2. ....  | 26          |
| Figura 1.5. Ubicación General de la Estación de Flujo Oeste 2 (DEFO-2) y la<br>Estación Principal Dación Oeste (DEPO)..... | 27          |
| Figura 2.1. Toma de muestra de arena para el estudio.....  | 33          |
| Figura 2.2. Variación de la tasa de erosión con el ángulo de incidencia. ....  | 39          |
| Figura 2.3. Separación Sólido-Líquido. ....  | 41          |
| Figura 2.4. Esquema de una válvula de control .....  | 44          |
| Figura 2.5. Diagrama esquemático de un separador Líquido-Gas .....   | 45          |
| Figura 2.6. Diferentes patrones de flujo bifásico .....  | 46          |
| Figura 2.7. Mecanismos de colección de partículas en un ciclón .....   | 50          |
| Figura 2.8. Vórtices en el ciclón .....  | 51          |
| Figura 2.9. Dimensiones del ciclón.....  | 56          |
| Figura 2.10. Eficiencia de colección del ciclón .....  | 56          |
| Figura 2.11. Separación de sólidos usando fuerza centrífuga.....   | 68          |
| Figura 2.12. Sistema de separación de sólidos en el cabezal del pozo. ....   | 70          |
| Figura 2.13. Sistema tipo hidrociclón. (TORE). ....  | 72          |
| Figura 2.14. Toberas de cono plano y cono completo .....   | 75          |
| Figura 2.15. Limpieza de arena en Oleoductos y tuberías. ....  | 76          |
| Figura 3.1. Diagrama de Flujo de la Metodología de Trabajo. ....   | 82          |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 3.2. Plano del múltiple D2–L–E que va a DAC-3, localizado en el área de la U.P Dación. ....                             | 84  |
| Figura 3.3. Plano del múltiple D2 – R – SE que va a DAC-3, localizado en el área de la U.P Dación. ....                        | 85  |
| Figura 3.4. Plano del múltiple WFS-R-W1 y WFS-R-W2 que va a DEFO-2, localizado en el área de la U.P Dación. ....               | 86  |
| Figura 3.5. Tipo de tamiz TYLER ASTME 11-61, utilizado para las tomas de muestras de arenas. ....                              | 87  |
| Figura 3.6. Puntos de recolección de muestras de fluidos. ....   | 88  |
| Figura 3.7. Gráfico de Viscosidad en función de la temperatura. ....   | 89  |
| Figura 3.8. Vista general de la sección removida para Análisis ....  | 90  |
| Figura 3.9. Muestra en estado de entrega. ....   | 90  |
| Figura 3.10. Muestra separada ....   | 90  |
| Figura 3.11. Datos de entrada generales del PIPEPHASE 8.1. ....  | 92  |
| Figura 3.12. Líneas de recolección hasta DEFO-2 y sus propiedades. ....  | 93  |
| Figura 3.13. Modelo de equipo desarenador ciclón ....  | 96  |
| Figura 4.1. Diagrama esquemático de los Múltiples y Líneas de recolección de los fluidos de DEFO-2. ....                       | 101 |
| Figura 4.2. Diseño del Sistema actual de Recolección de flujo. ....  | 104 |
| Figura 4.3. Esquema del sistema indicando los cambios de diámetros en las líneas de recolección de flujo (caso 1). ....        | 106 |
| Figura 4.4. Esquema del sistema indicando los cambios de diámetros en las líneas (caso 2). ....                                | 109 |
| Figura 4.5. Variación de las Velocidades Erosivas de la línea L001 (salida del múltiple D2-RSE) a lo largo de la línea. ....   | 112 |
| Figura 4.6. Variación de la Máxima Caída de Presión de la línea L001 (salida del múltiple D2-RSE) a lo largo de la línea. .... | 112 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 4.7. Variación de las Velocidades Erosivas de la línea L002 (salida del múltiple D2-LE-B) a lo largo de la línea. ....  | 113 |
| Figura 4.8. Variación de la Máxima Caída de Presión de la línea L002 (salida del múltiple D2-LE-B) a lo largo de la línea.....   | 113 |
| Figura 4.9. Variación de las Velocidades Erosivas de la línea L003 (recolecta los fluidos de las líneas L001 y L002) a lo largo de la línea.....                             | 114 |
| Figura 4.10. Variación de la Máxima Caída de Presión de la línea L003 (recolecta los fluidos de las líneas L001 y L002) a lo largo de la línea.....                          | 114 |
| Figura 4.11. Variación de las Velocidades Erosivas de la línea L004 (salida del múltiple D2-LE-A) a lo largo de la línea. ....   | 115 |
| Figura 4.12. Variación de la Máxima Caída de Presión de la línea L004 (salida del múltiple D2-LE-A) a lo largo de la línea. ....   | 115 |
| Figura 4.13. Variación de las Velocidades Erosivas de la línea L005 (recolecta los fluidos de las líneas L001, L002, L003 y L004) a lo largo de la línea. ....               | 116 |
| Figura 4.14. Variación de la Máxima Caída de Presión de la línea L005 (recolecta los fluidos de las líneas L001, L002, L003 y L004) a lo largo de la línea. ....             | 116 |
| Figura 4.15. Variación de las Velocidades Erosivas de la línea L007 (recolecta los fluidos de las líneas L001, L002, L003, L004, L005 y L006) a lo largo de la línea. ....   | 117 |
| Figura 4.16. Variación de la Máxima Caída de Presión de la línea L007 (recolecta los fluidos de las líneas L001, L002, L003, L004, L005 y L006) a lo largo de la línea. .... | 117 |
| Figura 4.17. Diseño del Sistema de Recolección de flujo con líneas paralelas. ....   | 119 |
| Figura 4.18. Esquema del sistema con lazos indicando los cambios de diámetros en las líneas L003 y L011. ....  | 122 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.19. Esquema del sistema con lazos (Caso 2) indicando los cambios de diámetros en las líneas L002, L004 y Lazo L008. ....   | 125 |
| Figura 4.20. Variación de la Caída de Presión en la línea L002 (salida del múltiple D2-LE-B) para el sistema con y sin lazos (caso 2). ....   | 128 |
| Figura 4.21. Variación de las Velocidades Erosivas en la línea L002 (salida del múltiple D2-LE-B) para el sistema con y sin lazos (caso 2). ....  | 128 |
| Figura 4.22. Variación de la Caída de Presión en la línea L003 (recolecta los fluidos de las líneas L001 y L002) para el sistema con y sin lazos (caso 2). ....                         | 129 |
| Figura 4.23. Variación de las Velocidades Erosivas en la línea L003 (recolecta los fluidos de las líneas L001 y L002) para el sistema con y sin lazos (caso 2). ....                    | 129 |
| Figura 4.24. Variación de la Caída de Presión en la línea L004 (salida del múltiple D2-LE-A) para el sistema con y sin lazos (caso 2). ....   | 130 |
| Figura 4.25. Variación de las Velocidades Erosivas en la línea L004 (salida del múltiple D2-LE-A) para el sistema con y sin lazos (caso 2). ....  | 130 |
| Figura 4.26. Variación de la Caída de Presión en la línea L005 (recolecta los fluidos de las líneas L001, L002, L003 y L004) para el sistema con y sin lazos (caso 2). ....             | 131 |
| Figura 4.27. Variación de las Velocidades Erosivas en la línea L005 (recolecta los fluidos de las líneas L001, L002, L003 y L004) para el sistema con y sin lazos (caso 2). ....        | 131 |
| Figura 4.28. Variación de la Caída de Presión en la línea L007 (recolecta los fluidos de las líneas L001, L002, L003, L004, L005 y L006) para el sistema con y sin lazos (caso 2). .... | 132 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.29. Variación de las Velocidades Erosivas en la línea L007 (recolecta los fluidos de las líneas L001, L002, L003, L004, L005 y L006) para el sistema con y sin lazos (caso 2)..... | 132 |
| Figura 4.30. Diseño del Sistema de la línea de transferencia hasta DEPO. ....   | 133 |
| Figura 4.31. Variación de la Velocidad Erosiva (línea que transfiere los fluidos a DEPO) a lo largo de la línea en cada caso, comparado con la Norma API RP 14E. ....                       | 135 |
| Figura 4.32. Variación de la Caída de Presión (línea que transfiere los fluidos a DEPO) a lo largo de la línea en cada caso, comparado con los Códigos y Normas ASME/ANSI B31.3.....        | 135 |
| Figura 4.33. Distribución del tamaño de la partícula. ....  | 137 |
| Figura 4.34. Tecnología PDVSA – Distrito Morichal (Tanque de lavado). ....  | 138 |
| Figura 4.35. Tecnología PDVSA – Distrito Norte, separación por placa impacto. ...   | 138 |
| Figura 4.36. Tecnología EQUIPETROL.....   | 140 |
| Figura 4.37. Tecnología COTRAP. ....  | 140 |

## LISTADO DE TABLAS

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Tabla 2.1. Escala granulométrica .....   | 34          |
| Tabla 2.2. Valores de referencia de dureza Vickers de algunos materiales y partículas .....  | 41          |
| Tabla 2.3. Características de los ciclones convencionales.....   | 53          |
| Tabla 2.4. Características de los ciclones de alta eficiencia .....  | 54          |
| Tabla 2.5. Características de los ciclones de alta capacidad.....  | 55          |
| Tabla 2.6. Parámetros de diseño para sistemas de chorro de agua en separadores horizontales .....  | 74          |
| Tabla 2.7. Reglas generales de selección del tipo de cochinos.....   | 79          |
| Tabla 3.1. Tamaño de partículas .....  | 91          |
| Tabla 4.1. Datos de entrada de las líneas de salida de los Múltiples .....   | 98          |
| Tabla 4.2. Datos de las líneas de recolección.....   | 99          |
| Tabla 4.3. Datos de entrada de DEFO-2 y DEPO.....  | 99          |
| Tabla 4.4. Datos a la salida de DEFO-2.....  | 100         |
| Tabla 4.5. Valores de la velocidad erosiva y caídas de presión de acuerdo a los Códigos y Normas API RP 14E y ASME/ANSI B31.3.....       | 102         |
| Tabla 4.6. Características del flujo de las líneas de salidas de los múltiples .....   | 103         |
| Tabla 4.7. Variación de las velocidades erosivas y caídas de presión en el sistema de recolección de flujo .....                         | 105         |
| Tabla 4.8. Comparación de las velocidades erosivas del caso 1 con el sistema de recolección de flujo original y la Norma API RP 14E..... | 107         |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 4.9. Comparación de las caídas de presión del caso 1 con el sistema de recolección de flujo original, los Códigos y Normas ASME/ANSI B31.3 .....  | 108 |
| Tabla 4.10. Comparación de las velocidades erosivas del caso 2 con el sistema de recolección de flujo original y la Norma API RP 14E .....  | 110 |
| Tabla 4.11. Comparación de las caídas de presión del caso 2 con el sistema de recolección de flujo original, los Códigos y Normas ASME/ANSI B31.3 .....   | 111 |
| Tabla 4.12. Comparación de las velocidades erosivas y caídas de presión en las líneas L005 y L007 entre el Sistema Original y el Sistema con Lazos..  | 120 |
| Tabla 4.13. Comparación de las velocidades erosivas y caídas de presión en las líneas L002 y L004 entre el Sistema Original y el Sistema con Lazos..  | 121 |
| Tabla 4.14. Comparación de las velocidades erosivas y caída de presión en la línea L003 entre el Sistema Original y el Sistema con Lazos.....   | 121 |
| Tabla 4.15. Comparación de las velocidades erosivas y caídas de presión en las líneas L005 y L007 entre el Sistema Original, el Sistema con Lazos y el Caso 1 con Lazos.....                      | 123 |
| Tabla 4.16. Comparación de las velocidades erosivas y caídas de presión en las líneas L002 y L004 entre el Sistema Original, el Sistema con Lazos y el Caso 1 con Lazos.....                      | 123 |
| Tabla 4.17. Comparación de las velocidades erosivas y caída de presión en la línea L003 entre el Sistema Original, el Sistema con Lazos y el Caso 1 con Lazos .....                               | 124 |
| Tabla 4.18. Comparación de las velocidades erosivas y caídas de presión en las líneas L005 y L007 entre el Sistema Original, el Sistema con Lazos, el Caso 1 con Lazos y el Caso 2 con Lazos..... | 125 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 4.19. Comparación de las velocidades erosivas y caídas de presión en las líneas L002 y L004 entre el Sistema Original, el Sistema con Lazos, el Caso 1 con Lazos y el Caso 2 con Lazos..... | 126 |
| Tabla 4.20. Comparación de las velocidades erosivas y caída de presión en la línea L003 entre el Sistema Original, el Sistema con Lazos, el Caso 1 con Lazos y el Caso 2 con Lazos .....          | 126 |
| Tabla 4.21. Comparación de las velocidades erosivas y caídas de presión entre el Sistema Original (Caso 2) y el Sistema con Lazos (Caso 2).....   | 127 |
| Tabla 4.22. Variación de la velocidad erosiva de cada uno de los casos en comparación con la Norma API RP 14E.....  | 134 |
| Tabla 4.23. Variación de la máxima caída de presión de cada uno de los casos en comparación con los Códigos y Normas ASME/ANSI B31.3 .....  | 134 |
| Tabla 4.24. Hoja de cálculo de un ciclón de alta eficiencia Tipo Stairmand.....   | 139 |



# **CAPÍTULO 1**

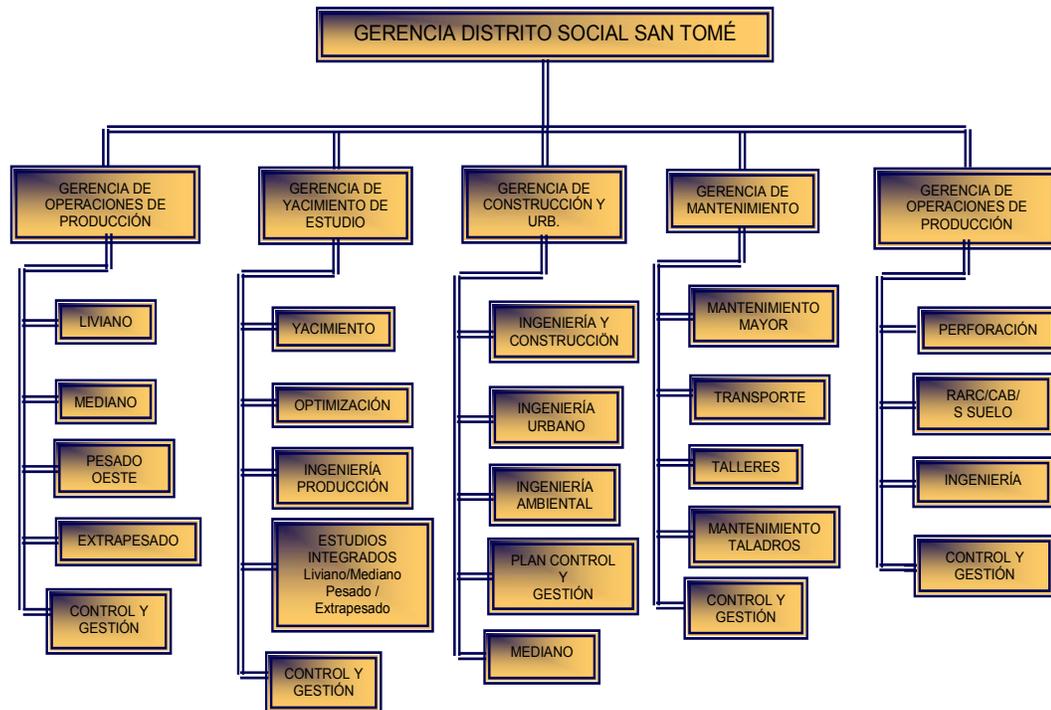
## **EL PROBLEMA**

### **1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO**

Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA) Exploración y Producción, realiza actividades de explotación, extracción, producción, refinación, transporte y comercialización de crudos y derivados. Sus áreas operativas se encuentran ubicadas en los estados productores de petróleo como: Anzoátegui, Apure, Barinas, Monagas y Zulia. PDVSA se encuentra organizada en tres Divisiones: Centro, Oriente y Occidente, las cuales se subdividen a su vez en Distritos Sociales operacionales, tales como: Distrito Puerto la Cruz, Distrito San Tomé, Distrito Anaco, entre otros.

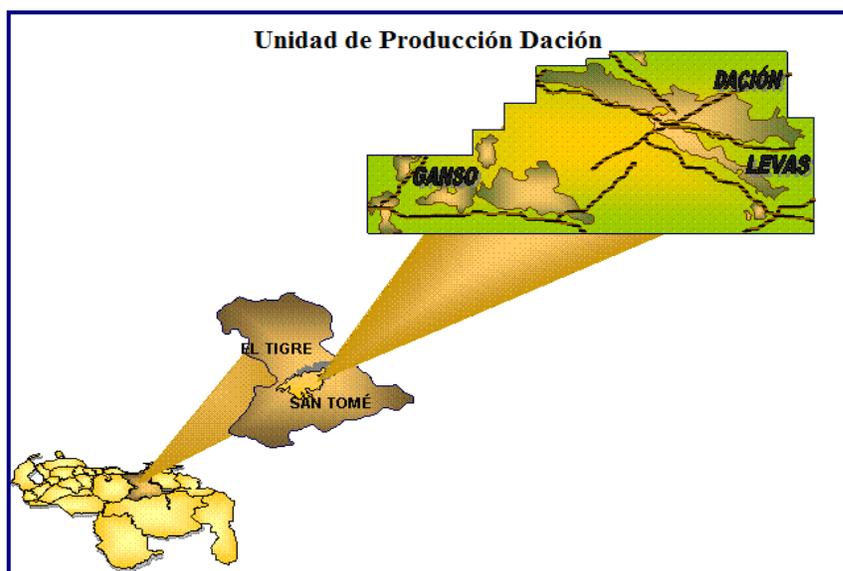
El área de estudio está ubicada en el Distrito Social San Tomé, el cual comprende parte de los Estados Anzoátegui y Guárico, así como el Sur del Estado Monagas y ocupa un área aproximada de 24 mil km<sup>2</sup>. Sus departamentos administrativos se encuentran ubicados a 35 km de la ciudad de El Tigre en la zona Sur del Estado Anzoátegui. Este Distrito Social es responsable del 80 % de las áreas pertenecientes a la Faja Petrolífera del Orinoco, como son Hamaca, Zuata y Machete, y a su vez está formada por las Unidades de Exploración de crudo pesado/extrapesado y liviano/mediano.

La Gerencia del Distrito Social San Tomé, está conformada por un conjunto de gerencias cuyo propósito común es garantizar la continua operatividad del Distrito, cumpliendo con los requerimientos de producción, servicios técnicos y de seguridad. La estructura organizativa del Distrito Social San Tomé se muestra en la Fig. 1.1.



**Figura 1.1. Organigrama de la Gerencia Distrito Social San Tomé.**

Al Sur-Este del Estado Anzoátegui cerca del Campo San Tomé, se encuentra ubicada la Unidad de Producción Dación, la cual agrupa los campos petroleros Dación, Ganso y Levas (Ver Fig. 1.2). Estos campos se extienden sobre un área de 427 km<sup>2</sup> dentro del Municipio Freites del Estado Anzoátegui. La Unidad de Producción Dación produce del yacimiento Oficina, el cual está limitado por debajo con la Formación Geológica Merecure y por la parte superior completamente cubierto por la Formación Geológica Freites.

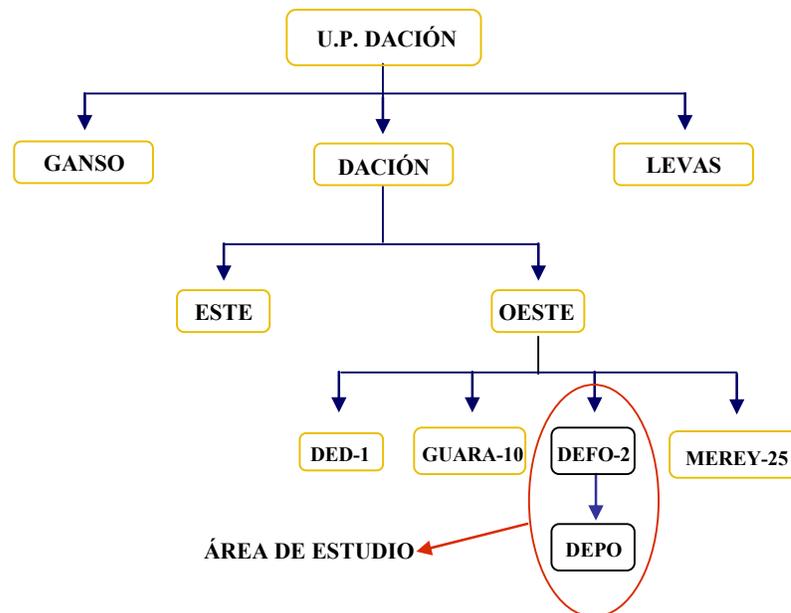


**Figura 1.2. Ubicación geográfica del bloque de Dación en el Estado Anzoátegui.**

## **1.2 RESEÑA HISTÓRICA**

El área de la Unidad de Producción Dación, fue descubierta en el año 1944, posee un total de 342 pozos, de los cuales hasta la fecha 337 se encuentran activos con una producción aproximada de 336 MBBPD (Millones de Barriles Brutos Por Día) de los cuales 46 MBPD (Millones de Barriles Por Día) son de petróleo y 290 MBPD (Millones de Barriles Por Día) son de agua. Para el manejo de estos fluidos se cuenta con estaciones de flujo, estaciones de descarga y estaciones principales de producción. La Unidad de Producción Dación se divide en dos Áreas Operativas: Área Oeste y Área Este. En el Área Oeste existen cinco estaciones: Estación de Descarga Dación 1 (DED-1), Estación de Descarga Guara 10, Estación de Flujo Mery 25, Estación de Flujo Dación Oeste (DEFO-2) y la Estación Principal Dación

Oeste (DEPO), (Ver Fig. 1.3). En el Área Este existen cinco estaciones: Estación de Flujo LTM-1, Estación de Flujo Levas 16, Estación de Flujo DEFE-1, Estación de Flujo DEFE-2 y la Estación Principal Dación Este.



**Figura 1.3. Organigrama de la Unidad de Producción Dación.**

El principal método de producción de la Unidad de Producción Dación es el levantamiento artificial por gas, el cual representa el 77% de toda la producción, el resto del campo es explotado a través de otros métodos de recuperación secundaria, entre los que se destacan: Bombeo de Cavidad Progresiva (BCP), Bombas de tipo Rotaflex, Bombeo Electrosumergible (BES) y el Flujo natural (realizado en muy pocos pozos).

En la Estación de Flujo DEFO-2 se encuentra ubicado un múltiple principal de recolección donde convergen o llegan la producción de los pozos, de los múltiples remotos y de los múltiples locales, que se encuentran en el área de estudio. Esta

estación consta de un separador horizontal que fue diseñado para llevar a cabo la separación gas – líquido y la transferencia hacia la Estación Principal DEPO. Esta última estación se encarga de lograr una especificación de Agua y Sedimentos inferior al 1% (%AyS < 1) necesario para su exportación.

### **1.2.1 Líneas de extracción de crudo que alimentan la estación de flujo DEFO-2 de la U.P Dación**

Los múltiples son definidos por su ubicación en Locales y Remotos. El Múltiple Local, es aquel múltiple que está ubicado geográficamente dentro de los linderos de una estación representado por DX-L-XX (ejemplo: D1-L-SE6, D3-L-SE4) y el Múltiple Remoto, es aquel múltiple que está ubicado geográficamente fuera de los linderos de una estación representado por DX-R-XX (ejemplo: D4-R-E2).

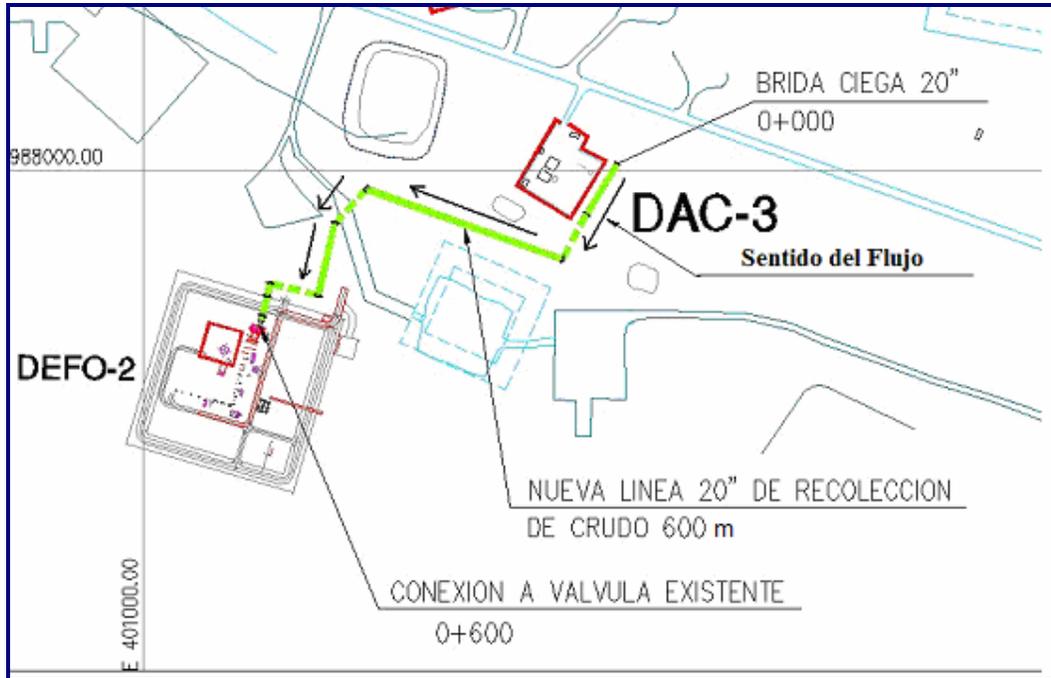
La línea de flujo proveniente del múltiple remoto D2-R-SE, posee un diámetro nominal de 0,406 m (16”) y 1475 m de longitud. Esta línea se encarga de transportar sus fluidos (crudo + gas + agua) hasta las adyacencias de la Estación Compresora Dación 3 (DAC-3), en donde se conecta a la línea de transferencia de 0,508 m (20”) que llega hasta DEFO-2, con una producción asociada de 2200 BNPD (Barriles Netos Por Día). La Empresa Productec en el año 2006 realizó un análisis de Integridad Mecánica, la cual confirmó que esta línea en su totalidad presentaba un alto nivel de corrosión fallando en varias oportunidades y planteó la necesidad de colocar una nueva línea de flujo con el fin de desincorporar la existente para evitar mayores fallas y derrames.

La línea de flujo proveniente del múltiple local D2-L-E, posee un diámetro nominal de 0,3048 m (12”) y 500 m de longitud. Esta línea se encarga de transportar sus fluidos hasta las adyacencias de DAC-3, en donde se conecta a la línea de

transferencia de 0,508 m (20") que llega hasta DEFO-2, con una producción asociada de 4723 BNPD (Barriles Netos Por Día), que proviene de los pozos locales. Esta línea por poseer mayor cantidad de producción y pozos asociados presentó alta corrosión y desgaste erosivo por la velocidad de los fluidos, debido al alto contenido de arena transportada, ya que a nivel de subsuelo estos pozos no poseen en su completación original empaquetamiento con gravas o algún método de protección contra el arenamiento.

Para mayo del año 2006 se planteó la necesidad de colocar una nueva infraestructura (múltiple WFS-R-W<sub>2</sub>) para garantizar el manejo de los volúmenes de crudo de los pozos asociados a las localizaciones ubicadas al Oeste de la Unidad de Producción Dación, los cuales estaban en el orden de 1200 BPD (Barriles Por Día) de petróleo, 1,1 MMPCD (millones de pies cúbicos) de gas y 1200 BPD (Barriles Por Día) de agua. La línea que sale de este múltiple posee un diámetro nominal de 0,254 m (10") y una longitud de 1460 m, la cual se conecta a la línea de transferencia de 0,508 m (20") que llega a DEFO-2. En la actualidad esta línea no ha presentado ningún tipo de falla que afecte la estación de flujo.

La línea de recolección de flujo de 0,508 m (20") de diámetro que llega a DEFO-2, tiene una longitud de 600 m desde DAC-3, permite transportar la producción de 7740 BNPD y permite mantener la producción de crudo del campo (Ver Fig.1.4).



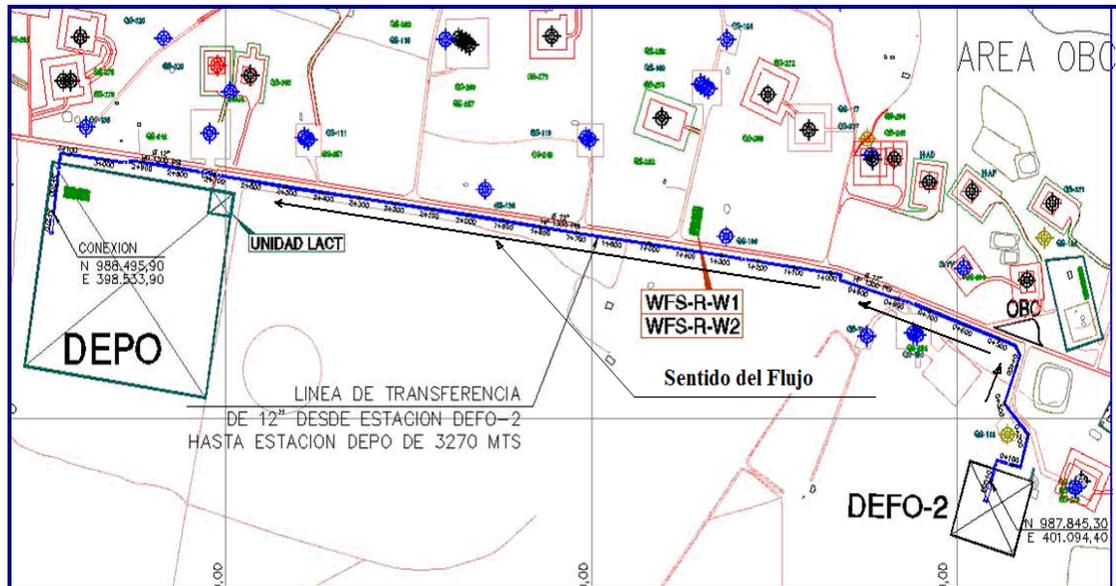
**Figura 1.4. Ubicación en detalle General de Estaciones DAC-3 y DEFO-2.**

### **1.2.2 Línea de transferencia desde la estación DEFO-2 hasta la estación principal DEPO**

DEPO centraliza la mayor parte de la producción en el área Oeste de la Unidad de Producción Dación y recibe fluidos provenientes de múltiples locales y remotos, de DEFO-2 y de la Estación de Descarga Guara 10 (GED-10).

La línea de transferencia desde la estación de flujo DEFO-2 hasta la estación principal DEPO, transporta una producción asociada de 7740 BNPD. DEFO-2 transfiere sus fluidos (crudo + agua) a través de una línea común de diámetro nominal de 0,3048 m (12”) y una longitud de 3270 m (Ver Fig. 1.5), la cual ha fallado en varias oportunidades desde el 2006. De acuerdo al estudio de Integridad Mecánica realizado ese mismo año, se determinó que los espesores medidos de las secciones de

tubería no se encuentran dentro de los rangos permitidos de trabajo, ya que están por debajo del espesor requerido por ASME B31.4, por lo tanto, las tuberías no están en condiciones de soportar la máxima presión de operación actual (135 psig).



**Figura 1.5. Ubicación General de la Estación de Flujo Oeste 2 (DEFO-2) y la Estación Principal Dación Oeste (DEPO).**

### 1.3 EL PROBLEMA

En la actualidad se presentan problemas mecánicos de erosión por la presencia de arena en las tuberías que alimentan a DEFO-2 y la línea de transferencia que transporta los fluidos (crudo + gas + agua) de DEFO-2 hacia DEPO. Estos problemas son debidos, a que el separador horizontal que se encuentra en DEFO-2 no realiza completamente su función de separar, solo desgasifica la mezcla. Este separador por no poseer un sistema que permita la extracción de arena, lleva a las bombas de salida a succionar todo el líquido y cierta cantidad de arena. Esta cantidad de arena contenida en el líquido se encarga de erosionar de manera agresiva la línea de

transferencia, ocasionando su ruptura en cortos períodos de tiempo, provocando derrames de fluidos (crudo y agua) que contaminan el ambiente, pérdidas en la producción de la estación DEPO y la generación de mayores gastos para el reemplazo de la línea.

Por lo antes expuesto, la Superintendencia de Infraestructura y Procesos de Superficie (G.I.P.S) conjuntamente con la Gerencia de Operación de Producción (G.O.P) y Superintendencia de Ingeniería de Producción (I.D.P), solicitaron un estudio hidráulico de todo el sistema de tuberías que alimentan a DEFO-2 y la línea de transferencia de DEFO-2 hasta DEPO, para conocer las posibles soluciones y recomendaciones a corto, mediano y largo plazo para solventar el problema de arenamiento, que permitan el control de arena a nivel de superficie y alargue la vida útil de dicha infraestructura. Dicho estudio se realizará utilizando el programa de simulación PIPEPHASE 8.1 y la Norma API-RP14E (Práctica Recomendada para el Diseño e Instalación de Sistemas de Tuberías para Plataforma de Producción).

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 General**

Evaluar hidráulicamente las líneas de extracción de crudo que alimentan y transfieren los fluidos de la Estación de Flujo DEFO-2, de la U.P. Dación, PDVSA-San Tomé Edo. Anzoátegui.

### **1.4.2 Específicos**

- 1.** Recopilar la información referente a la producción y características de los equipos de superficie que se encuentran ubicados en la U.P. Dación (Unidad de Producción Dación).

2. Realizar el levantamiento topográfico y dimensional de las tuberías que alimentan la Estación DEFO-2 y su línea de transferencia hasta la Estación Principal DEPO.
3. Recopilar la información de las características físicas y químicas de los fluidos (crudo-gas-agua) y arena presente en la mezcla.
4. Analizar hidráulicamente las tuberías de flujo que alimentan la Estación DEFO-2 y su línea de transferencia hasta la Estación Principal DEPO, usando el simulador PIPEPHASE 8.1 y la Norma API-RP14E.
5. Proponer soluciones a corto, mediano y largo plazo (posible instalación de hidrociclón), que permitan minimizar el desgaste por erosión de las líneas que alimentan la Estación de Flujo DEFO-2 y la línea de transferencia de DEFO-2 hasta DEPO.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 FENÓMENO DE ARENAMIENTO**

Este fenómeno se caracteriza por la producción de cantidades excesivas de arena de la formación, junto con los fluidos extraídos de los pozos.

El problema radica en las formaciones que no tienen la suficiente resistencia para poder soportar los esfuerzos de arrastre generado por el movimiento de fluidos a través de sí misma y por los esfuerzos generados debido a los gradientes de presión en la vecindad del pozo.

Los esfuerzos debido al arrastre de fluidos y a los gradientes del pozo son esfuerzos desestabilizadores, cuando estos esfuerzos son superiores a la resistencia mecánica de la formación se producen desprendimientos de partículas, creándose el fenómeno de arenamiento.

La producción de arena es una consecuencia de los cambios bruscos de las tasas de flujo, ya que esta es removida por las fuerzas de arrastre originadas por los fluidos contenidos en la roca, estas fuerzas se incrementan a mayor tasa de producción o de flujo, lo que implica que los granos de arena se separen, sean removidos por los fluidos y poco a poco van obstruyendo los canales de flujo, esto también ocurre como consecuencia de que el material cementante de los granos de arena no sea lo suficientemente cohesivo.

Esta producción de arena asociada a la producción de crudo, repercute gravemente en la productividad de los pozos, por el daño a las herramientas del subsuelo (workover del pozo o equipos de completación, tuberías, entre otros), así como en los equipos de superficie ocasionando una disminución de la producción y un incremento en los costos de mantenimiento [1].

Las causas que originan el problema de arenamiento en la Unidad de Producción Dación del Distrito Social San Tomé son muy variadas, entre estas se tienen las actividades de pozos como perforación, cementación, cañoneo, tasas de bombeo y estimulación; estas operaciones disminuyen sustancialmente la resistencia mecánica de la formación y aumentan las velocidades de los fluidos, las cuales causan esfuerzos de arrastre excesivos.

Las causas internas de la producción de arena también pueden ser ocasionadas por muchos otros factores, entre los cuales se tienen [1]:

**a) Flujo de Fluido.** Este es proporcional a la caída de presión entre el yacimiento y el pozo. La fuerza de arrastre impartida por el flujo del fluido está relacionada con el producto de la velocidad y la viscosidad del fluido. Si la arena proviene del yacimiento también puede afectar su producción. Cuando los fluidos son producidos de una formación arenosa, los esfuerzos actúan sobre los granos y tienden a moverlos en dirección al hoyo del pozo conjuntamente con los fluidos producidos. Cuando la combinación de las magnitudes de estas fuerzas excede la resistencia de la formación o cuando un pozo con alta tasa de producción y bajo grado de consolidación natural están presentes en la misma, ocurre la producción de arena.

**b) Factores Geográficos y Geológicos.** El análisis de arenas se realiza en localizaciones geográficas distintas; porque la roca de yacimientos más viejos

tienden a ser más consolidados y los problemas de producción de arena no son tan severos. Sin embargo, la producción de arena sigue dependiendo de la tasa de producción del pozo y de las fuerzas de arrastre, estas últimas pueden ser suficientemente alta como para causar la formación de producción de arena en yacimientos sujetos a fuerzas compresivas en el orden de 1000 psi.

**c) Consolidación Natural.** La oposición a las fuerzas de arrastre del fluido son las fuerzas de restricción que actúan sobre los granos de arena. Estas fuerzas se derivan de los depósitos intergranulares, fricción intergranular, fuerza gravitacional y fuerza capilar. La presión del yacimiento ayuda a soportar peso de la sobrecarga, de este modo actúa para aliviar la carga sobre los granos de arena. De todas estas fuerzas, los depósitos intergranulares constituyen el factor más importante en prevenir la producción de arena. La fuerza compresiva de la formación de arena es probablemente la mejor medición del depósito intergranular, si se realiza un buen seguimiento en la práctica de completación y producción, las formaciones con una fuerza compresiva que exceda los 1000 psi generalmente producirán libre de arena. La excepción es cuando la declinación de presión alrededor del pozo es alto; si la declinación de presión es baja, aunque la arena exhiba una fuerza de compresión muy baja también puede producir libre de arena.

**d) Flujo Multifásico.** En muchos casos, la producción de arena se incrementa substancialmente cuando los pozos comienzan a producir petróleo con agua o gas. Esto se puede explicar debido a que la producción de agua puede disolver parte del material cementante, provocando la producción de arena hasta el punto que los granos de arena no se ajusten por esas fuerzas, causando excesiva producción de arena.

## 2.2 MÉTODO PARA MEDIR EL CONTENIDO DE ARENA

Para conocer el contenido de arena que está presente en el crudo es necesario realizar un análisis granulométrico y de esta manera definir las propiedades físico-química de las partículas sólidas. Para este estudio en particular, se definirá el tipo de sólido, diámetro de la partícula, densidad, etc., además del porcentaje de arena contenido por barril en el crudo (Ver Fig 2.1).

La granulometría es la medición de los granos de una formación sedimentaria y el cálculo de la abundancia de los tamaños previstos por una escala granulométrica. (Ver Tabla 2.1).



**Figura 2.1. Toma de muestra de arena para el estudio.**

El método de determinación granulométrico más sencillo consiste en obtener las partículas por una serie de mallas de distintos anchos de entramado (a modo de coladores) que actúen como filtros de los granos [2].

**Tabla 2.1. Escala granulométrica [2]**

| <b>Partícula</b> | <b>Tamaño</b> |
|------------------|---------------|
| Arcillas         | < 0,002 mm    |
| Limos            | 0,002-0,06 mm |
| Arenas           | 0,06-2 mm     |
| Gravas           | 2 mm-6 cm     |
| Cantos rodados   | 6-25 cm       |
| Bloques          | >25 cm        |

### 2.3. EROSIÓN

Se define como la destrucción de un material por la acción combinada de la abrasión y la corrosión, o el desgaste causado por el flujo de líquido o gas (con o sin sólidos suspendidos).

Este proceso de erosión remueve el material por efectos mecánicos del fluido (por ejemplo, la arena cuando incide contra la superficie del material), el efecto de roce continuo entre dos superficies, el impacto del líquido, etc.

Los factores que gobiernan la erosión son:

#### a) Características de los sólidos

- Tamaño y distribución del tamaño
- Dureza
- Densidad
- Forma y composición

**b) Característica de la fase líquida**

- Densidad
- Viscosidad

**c) Condiciones de flujo**

- Regímenes de flujo: Laminar o turbulento
- Heterogéneo u Homogéneo

La magnitud de la erosión depende de la interrelación de muchos factores, entre los cuales se pueden nombrar las propiedades y estructura del material a erosionarse, las condiciones de microexposición y macroexposición, así como las características físico-químicas de las partículas erosivas. La unión de todos estos factores que influyen en la erosión de un material, juegan un papel muy importante en la tasa de desgaste.

La erosión del material a causa de pequeñas partículas sólidas se origina por un proceso mecánico de microdeformación. En materiales dúctiles, el impacto de las partículas puede causar daños severos, al punto de producir deformación plástica en el material al exceder la tensión de ruptura [1].

Este fenómeno de erosión, ocurre en aquellos lugares de la tubería en donde se producen cambios bruscos del comportamiento del fluido, es decir, cambios de dirección y velocidad, los cuales son causados por la presencia de codos, válvulas, empalmes de tuberías y conexiones roscadas, que perturban el paso del fluido. Por lo tanto, este fenómeno depende de algunos parámetros como la velocidad del fluido, geometría de la tubería, propiedades del fluido y tasa de producción. Para atacar este fenómeno de erosión, la empresa cuenta con el programa de simulación PIPEPHASE

8.1, que predice la presión, la temperatura, velocidades de la mezcla, velocidades de erosión, caída de presión, número de Reynolds, etc, en pozos, líneas de flujo, sistemas de recolección, y otras configuraciones lineales o de red de tubería.

Varios contenidos especiales también se han diseñado en PIPEPHASE 8.1 incluyendo: análisis de la elevación de gas, tubería sphering y análisis (nodal) de sensibilidad; y de acuerdo a las diferentes propiedades que se tengan del fluido y el ambiente se puede especificar el mejor modelo para realizar los análisis. Estas adiciones amplían el uso de PIPEPHASE 8.1 para poder solucionar la gama completa de problemas de la red de la tubería.

En la simulación aplicada en este estudio usando el simulador PIPEPHASE 8.1, se seleccionó el módulo tipo Network Model que aplica para el tipo de fluido Blackoil, por poseer mayores datos de las propiedades de los fluidos (gravedad API, relación gas-petróleo, corte de agua, viscosidad y densidad) y datos de presión, temperatura, conductividad del medio ambiente, tipo de tubería, diámetros, etc.,.

### **2.3.1 Desgaste Erosivo**

El desgaste por erosión, es fundamentalmente mecánico y se produce por el choque o impacto de partículas transportadas por un fluido (líquido o gas), contra un objeto, debido al movimiento relativo existente entre ambos.

La erosión por partículas sólidas en equipos e instalaciones de superficie en la Industria Petrolera origina problemas en la producción, ya que los costos asociados son muy elevados. Las tuberías de acero al carbono, grado API, tradicionalmente utilizado en instalaciones de subsuelo y superficie, bajo condiciones de elevadas presiones y temperaturas de trabajo, cambios bruscos en la dirección de los fluidos,

altos régimen de flujo y elevadas velocidades, además de la presencia de sólidos, resultan muy susceptibles a los ataques erosivos.

La velocidad de los fluidos y la fuerza de impacto son factores importantes que influyen en el desgaste del material y en la pérdida de sus propiedades (dureza, ductilidad, resistencia a la fatiga, etc.). Los estudios de laboratorio y campo sugieren que existen velocidades críticas de producción, por encima de las cuales las velocidades de erosión aumentan rápidamente hasta valores inaceptablemente altos. La correlación más comúnmente utilizada en la Industria Petrolera para determinar la velocidad erosional, definida como aquella velocidad por encima de la cual los problemas de erosión comienzan, está dada por la Norma API-RP 14 E:

$$V_e = \frac{C}{\sqrt{\rho}} \quad (2.1)$$

donde:

$V_e$  = Velocidad crítica de erosión, (m/s)

$C$  = Constante adimensional

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

La única variable considerada para la Ec. (2.1) es la densidad del fluido,  $\rho$ . La fórmula sugiere que la velocidad límite podría incrementarse cuando decrece la densidad de flujo. Esta Norma recomienda que la velocidad de flujo en tuberías no debiera exceder el valor de  $V_e$ , a fin de evitar problemas de erosión. Los valores establecidos para  $C$ , que son 100 en caso de servicios continuos y 125 para servicios intermitentes, no considera la presencia de arena en los fluidos [1].

### **2.3.2 Factores que afectan la erosión por los hidrocarburos y aguas que transportan sólidos**

Existen una serie de factores que influyen sobre los mecanismos erosivos causados por los hidrocarburos y las mezclas de fluidos que transportan los sólidos; a continuación se describen tales factores [3]:

➤ **Tamaño y forma de la partícula**

Se sabe que las partículas con forma angulada causan mayor erosión que las redondeadas. A través de estudios cualitativos se ha logrado determinar que en ocasiones la erosión generada por las partículas con forma angulada es al menos 10 veces mayor.

En términos de tamaño, a mayor tamaño más grande es la fuerza de impacto en razón del incremento de la masa. Algunos estudios recientes efectuados por Conoco [3] indican que las partículas con tamaño  $< 40 \mu\text{m}$  no generan problemas significativos de erosión.

➤ **Concentración de partículas**

La erosión se incrementa en las concentraciones bajas de partículas, a medida que la concentración aumenta y la misma alcanza cerca de un 20% tiende a estabilizarse. Esto se atribuye a un efecto amortiguador que se genera por el rebote de las partículas, lo cual restringe la cantidad de partículas que logran impactar a la superficie.

➤ **Velocidad de la partícula y del fluido**

La erosión es en particular un problema en los pozos de gas o en los que tienen altas tasas de relación gas-petróleo. El gas presente en los hidrocarburos le imprime aceleración a las partículas de arena e incrementa su fuerza de impacto. La velocidad de la erosión en las mezclas de agua, petróleo y gas se pueden correlacionar con la velocidad del fluido por medio de la siguiente ecuación:

$$R = KV^n \quad (2.2)$$

donde:

$R$  = Tasa de erosión (m/s)

$K$  = Constante.

$V$  = Velocidad (m/s)

$n$  = Coeficiente ~ (2-3)

➤ Ángulo de impacto

El ángulo de impacto o el ángulo de ataque es aquel en que la partícula impacta la superficie en relación con el plano horizontal de la misma. En la Fig. 2.2 se ilustra el efecto de dicho ángulo en la velocidad de erosión. Como se evidencia, en un ángulo entre 27° y 33° ambas componentes son máximas.

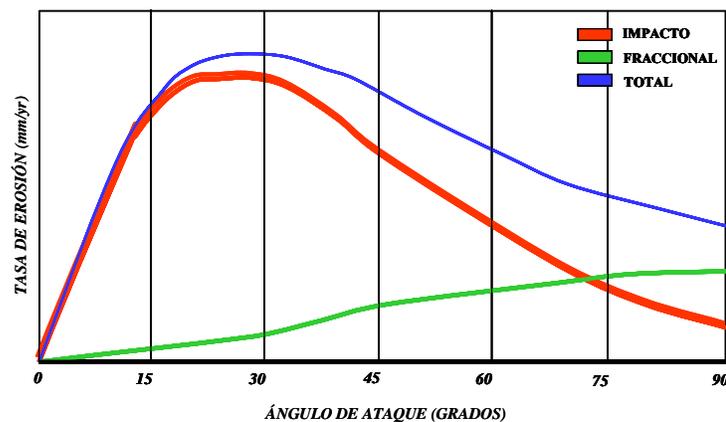


Figura 2.2. Variación de la tasa de erosión con el ángulo de incidencia.

En la mayoría de las aplicaciones es frecuente observar una combinación de ángulos de impacto, como es el caso con las tuberías y los componentes de fondo. En los componentes de los equipos de superficie además de la erosión en las tuberías, chokes y válvulas, se presta atención específica a la superficie de los recipientes separadores a causa del lavado de arena en el cual se aplican chorros a presión que impactan en el fondo del recipiente y por ende generan turbulencia y altas velocidades.

➤ Dureza del material

Una propiedad importante de los materiales en los pozos y en los equipos de proceso es su dureza. De hecho, el tratamiento térmico de los aceros incrementa la resistencia a la erosión de este material a medida que aumenta su dureza. La modificación de la composición química de un acero en particular también contribuye a incrementar la resistencia a la erosión como es el caso cuando se añade cromo.

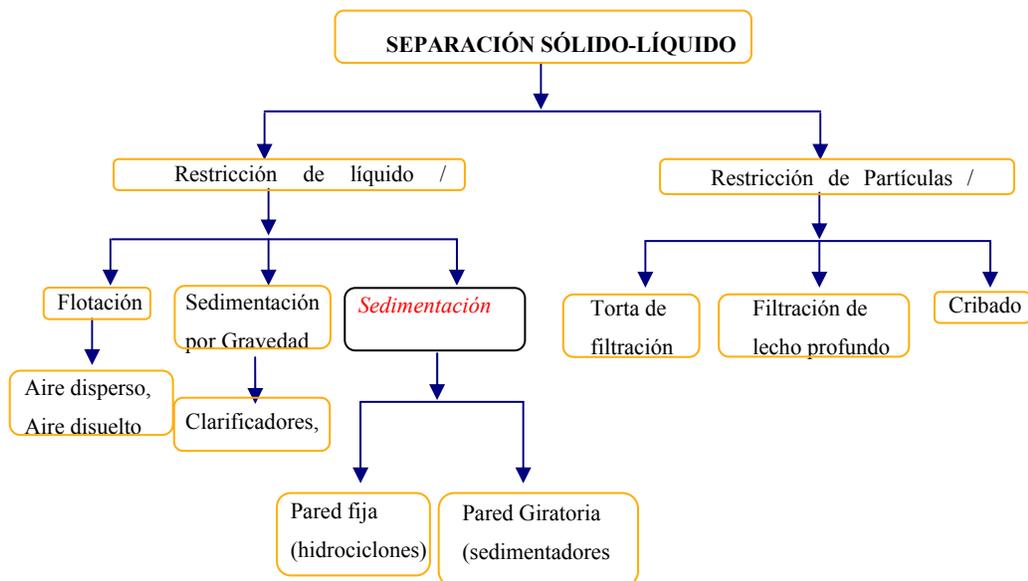
Los materiales aislantes y de revestimiento como las cerámicas y las resinas que se emplean en las plantas y en los equipos son fáciles de erosionar. Está documentado que el vidrio puede ser más resistente a la erosión que el acero dulce que se emplea en los separadores primarios [3]. En la Tabla 2.2 se muestra los valores de la dureza correspondientes a diversos materiales y partículas.

**Tabla 2.2. Valores de referencia de dureza Vickers de algunos materiales y partículas [3]**

| MATERIAL         | DUREZA     |
|------------------|------------|
| Acero inoxidable | [175-290]  |
| Acero al carbón  | [145-190]  |
| Hierro Fundido   | 240        |
| Cristal          | 530        |
| Alúmina          | [960-1800] |
| Cuarzo           | 1200       |
| Arena sílica     | 800        |

## 2.4 MÉTODO PARA LA SEPARACIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO

La separación sólido-líquido se puede realizar de acuerdo a la necesidad que se requiere en la separación, ya sea para dejar las partículas libres y desechar el líquido o viceversa (Ver Fig. 2.3).



**Figura 2.3. Separación Sólido-Líquido.**

## 2.5 TEORÍA DE LA SEDIMENTACIÓN CENTRÍFUGA

La teoría de la sedimentación centrífuga establece que “una partícula sólida que se sedimenta a través de un líquido en un campo de fuerza centrífuga se encuentra sometida a una fuerza constantemente creciente al alejarse del eje de rotación”. Por consiguiente, nunca alcanza una velocidad “Terminal” verdadera; sin embargo, a cualquier distancia radial dada,  $r$ , la velocidad de asentamiento  $V$  de una partícula (lo suficientemente pequeña) se puede obtener en forma muy aproximada mediante la relación de la Ley de Stokes [4]:

$$V = \frac{d^2(\rho_p - \rho_l)g}{18\mu} \quad (2.3)$$

donde:

$V$  = Velocidad de sedimentación (m/s)

$d$  = Diámetro de la partícula (cm)

$\rho_p$  = Densidad de la partícula ( $\text{g/cm}^3$ )

$\rho_l$  = Densidad del líquido ( $\text{g/cm}^3$ )

$\mu$  = Viscosidad del medio (kg/ms)

$g$  = fuerza gravitacional ( $\text{m/s}^2$ )

De la Ec. (2.3) se puede inferir que:

1. La velocidad de sedimentación es proporcional al tamaño de la partícula.
2. La velocidad de sedimentación es proporcional a la diferencia entre la densidad de la partícula y la densidad del medio circundante.
3. La velocidad de sedimentación es 0, cuando la densidad de la partícula es igual a la densidad del medio circundante.
4. La velocidad de sedimentación disminuye al aumentar la viscosidad del medio.

5. La velocidad de sedimentación aumenta al aumentar la fuerza del campo centrífugo.

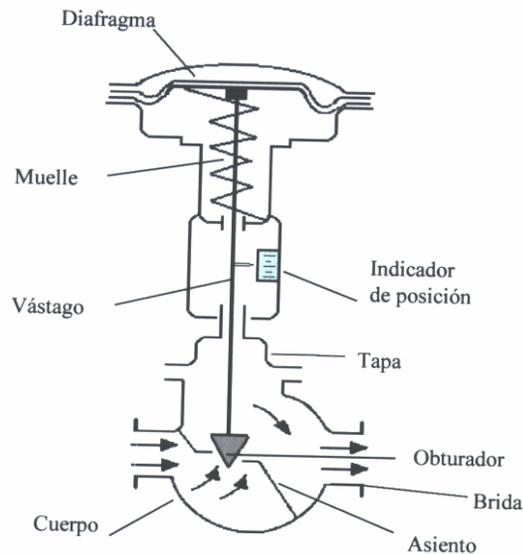
La separación en hidrociclones, al igual que en las centrífugas de sedimentación, está basada en la Ley de Stokes. En estos equipos las partículas más grandes y pesadas contenidas en un fluido dado, sedimentarán más rápido debido a la aceleración mecánica, lo que hace posible la separación.

La acción conjunta de la arena y las altas tasas de producción incrementan considerablemente los problemas de erosión de reductores, líneas de flujo, válvulas de control de nivel de los separadores, válvulas de líneas de flujo en las estaciones, tubería de producción, etc. Para el caso de los separadores, la presencia de arena puede causar mayores daños ya que puede destruir los internos. Similarmente, la arena o sólidos que no se sedimenten en los tanques de almacenamiento pueden viajar con el crudo hacia las bombas de crudo, causando daño a los impulsores y carcasas de las mismas.

La gran cantidad de depósito de arena en el fondo de los tanques de almacenamiento y los separadores reducen su capacidad de operación y por ende su eficiencia [5]. En la Unidad de Producción Dación existe una gran cantidad de equipos que están expuestos a los problemas de erosión, entre ellos se encuentran:

- a) Válvulas de control.** El flujo a alta velocidad en las válvulas de control convencionales ocasiona erosión; ésta se produce porque la alta velocidad limpia la superficie del metal con lo que la película protectora se elimina en forma continua y se desgasta el metal. También ocurre con fluidos que contienen partículas sólidas que producen abrasión de la superficie del metal. Una válvula de control consiste en dos partes principales, el cuerpo y el actuador (Ver Fig.

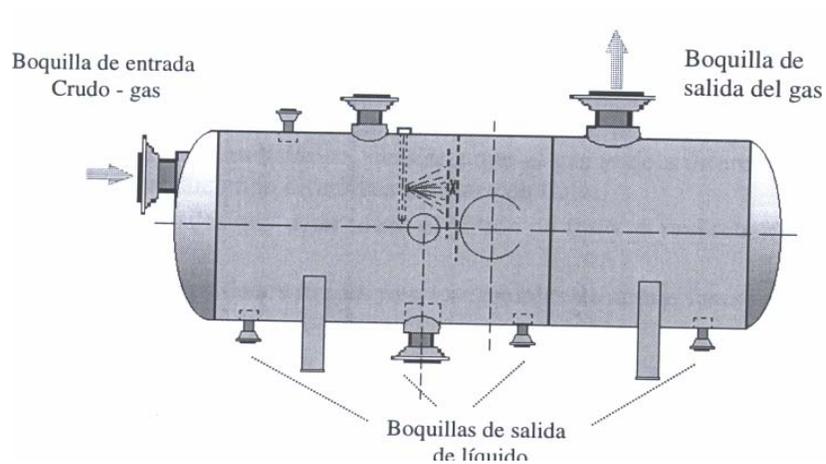
2.4). La función del actuador es responder a la señal del controlador automático y mover las guarniciones de la válvula para variar el flujo [5].



**Figura 2.4. Esquema de una válvula de control [5].**

**b) Separadores.** El término separador se aplica a una gran variedad de equipos usados para separar mezclas de dos o más fases (Ver Fig. 2.5). Los principios fundamentales considerados para realizar la separación física de vapor, líquidos o sólidos son: el momentum o cantidad de movimiento, la fuerza de gravedad y la coalescencia. Toda separación puede emplear uno o más de estos principios, pero siempre las fases de los fluidos deben ser inmiscibles y de diferentes densidades para que ocurra la separación.

***Internos de los separadores.*** Para ayudar al proceso de separación y/o impedir problemas de operación aguas abajo del equipo separador, dentro del recipiente se incluyen ciertos dispositivos, los cuales serán conocidos genéricamente como “internos”.



**Figura 2.5. Diagrama esquemático de un separador Líquido-Gas [6].**

Entre los internos más usados se tienen: deflectores, distribuidores y ciclones de entrada, eliminadores de niebla, rompe vórtices, etc [6].

La acción erosiva de la arena afecta directamente a los deflectores, reduciendo posiblemente el tamaño de la boquilla de entrada y en cierta medida, las dimensiones del equipo.

## 2.6 PATRONES Y RÉGIMENES DE FLUJO EN DOS FASES

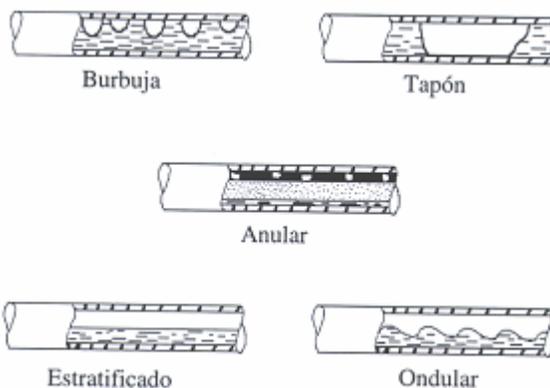
En las tuberías de producción de crudo se suelen encontrar tres fluidos posibles, petróleo, agua y gas, que son los medios en los cuales los sólidos son transportados. Dependiendo del movimiento de los fluidos dentro de la tubería, los sólidos tendrán un comportamiento acorde con ello. El patrón de flujo es un término que se utiliza cuando fluyen simultáneamente dos o más fases en un ducto, y describe las características físicas e hidrodinámicas del flujo. En un fluido multifásico se pueden encontrar muchas maneras en las que se desplaza el líquido y el gas, y al mismo tiempo ser afectado por la posición de la tubería [7].

Para el caso de fluidos líquido – gas se ha encontrado que los patrones de flujo se correlacionan empíricamente como funciones de las velocidades de flujo y las propiedades de las fases. Sin embargo, las fronteras y los límites entre tales patrones no se han definido con plena claridad, debido a que las transiciones son graduales y las fronteras dependen de las interpretaciones de los investigadores y de las configuraciones de la tubería, así como de los fluidos que se traten.

Sobre tuberías horizontales se han presentado informes de los siguientes tipos generales de patrones de flujo (Ver Fig. 2.6):

**a) Flujo de burbujas (bubble flow).** En este patrón, en el que las burbujas de gas se encuentran dispersas en el líquido, ocurren velocidades superficiales del líquido de 1,524 a 4,572 m/s (5 a 15 pies/s) aproximadamente y las velocidades superficiales del gas van de 0,3048 a 3,048 m/s (1 a 10 pies/s) aproximadamente.

**b) Flujo en forma de tapón (slug flow).** En este patrón se registran tapones alternos de líquido y gas que se desplazan a lo largo de la parte superior de la tubería. Ocurren a velocidades superficiales del líquido inferior a 0,6096 m/s (2 pies/s) y a velocidades superficiales del gas menores de 0,9144 m/s (3 pies/s).



**Figura 2.6. Diferentes patrones de flujo bifásico [7].**

**c) Flujo estratificado (stratified flow).** Este patrón, en el que el líquido fluye a lo largo de la base de la tubería y el gas lo hace sobre una interfase de flujo suave líquido – gas, tiene lugar a velocidades bajas del líquido junto a velocidades muy bajas del gas. En estas condiciones se produce una completa estratificación de los fluidos. El gas se ubica en la parte superior de la línea sobre una interfase gas – líquido llano y suave.

**d) Flujo anular (annular mist flow).** En este patrón, el líquido fluye como una película en torno a la pared interna de la tubería y el gas fluye a altas velocidades como si fuera el núcleo. Además, existe una porción de líquido que se arrastra en forma de rocío por el núcleo central de gas.

**e) Flujo ondular (wave flow).** Este patrón es similar al estratificado, excepto que la interfase tiene ondas que se desplazan en la dirección del flujo. Esto ocurre a velocidades superficiales de líquido menores de 0,3048 m/s (1pie/s), aproximadamente, y a velocidades superficiales del gas de 4,572 m/s (15 pies/s), aproximadamente.

## **2.7 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE UN SEPARADOR SÓLIDO-LÍQUIDO**

La selección de un separador sólido-líquido se inicia considerando las diferentes alternativas posibles y finaliza con la compra del equipo según sus características. Esto se hará considerando la confiabilidad y operatividad del equipo; el mismo debe cubrir los requerimientos que permitan obtener un rendimiento óptimo.

Es importante tomar en consideración las capacidades y las limitaciones de los dispositivos que se encuentran disponibles en el mercado. Muchos de ellos se diseñan

para aplicaciones muy específicas, por lo que es recomendable estudiar todas las variables involucradas en el proceso.

Las etapas a seguir para la selección de un separador sólido-líquido son [1]:

**a) Definición del problema general.** Esta etapa involucra una completa descripción del problema de separación, es decir, el problema debe definirse con tanta amplitud como sea posible, partiendo desde el origen de éste, hasta el producto final que se desea obtener.

**b) Establecimiento de las condiciones de operación.** Consiste en definir las propiedades del material a separar, las cantidades a alimentar, las variables operacionales y los materiales de construcción, así como las hipótesis.

**c) Relación de selecciones preliminares.** La recopilación de información básica permite seleccionar en forma provisional equipos prometedores y excluir los que no parecen adecuados. Basándose en un estudio de los dispositivos disponibles en el mercado es posible recabar en forma eficiente la información necesaria para una correcta selección del equipo, según las necesidades que se tengan.

**d) Realización de pruebas.** A veces es conveniente llevar a cabo pruebas preliminares, reconociendo que los resultados pueden requerir una confirmación mediante estudios subsiguientes en gran escala. De esta manera, se probará la eficiencia que puede reportar el dispositivo en evaluación.

**e) Consulta con los fabricantes de equipos.** Una vez que se han estudiado las diferentes opciones, conviene pedir ayuda a los fabricantes de los separadores sólido

– líquido más prometedor. Se pueden realizar pruebas adicionales en un centro de prueba del fabricante o a nivel del campo.

**f) Selección final.** La elección final de un separador exige una definición clara del problema en términos amplios, un catálogo completo de información sobre el procesamiento y la selección preliminar y provisional de equipos. La seguridad, la flexibilidad de la operación y la facilidad de mantenimiento, deben pesar mucho en la evaluación económica final.

## 2.8 EQUIPOS DESARENADORES

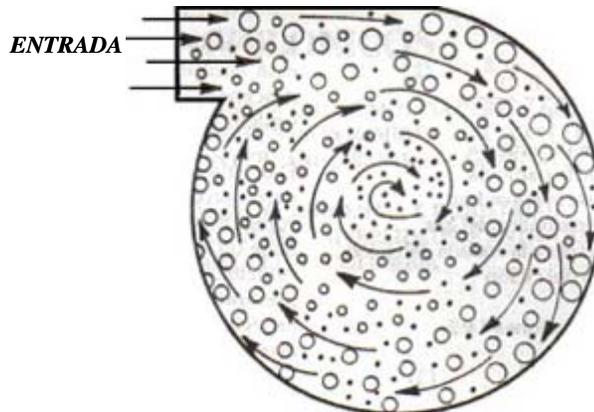
Son equipos diseñados específicamente para remover el contenido de sólidos, en este caso arena, desde un fluido en movimiento, empleando para ello principios de separación mecánica tales como centrifugación, vibración, etc. Dentro de estos equipos se encuentran los hidrociclones, filtros centrífugos, tamizadores a chorro, ciclones, etc. Este estudio estará enfocado al análisis de hidrociclones como equipo desarenador.

### 2.8.1 Ciclón

El equipo de recolección de polvo que se usa con mayor frecuencia es el ciclón. Los ciclones remueven el material particulado de la corriente gaseosa, basándose en el principio de impactación inercial, generado por la fuerza centrífuga. La Fig. 2.7 muestra el movimiento de las partículas mayores hacia las paredes del ciclón debido a la fuerza centrífuga.

El ciclón es esencialmente una cámara de sedimentación en que la aceleración gravitacional se sustituye con la aceleración centrífuga. Estos equipos constituyen uno de los medios menos costosos de recolección de polvo, tanto desde el punto de vista de operación como de la inversión. Son básicamente construcciones simples que

no cuentan con partes móviles, lo cual facilita las operaciones de mantenimiento; pueden ser hechos de una amplia gama de materiales y pueden ser diseñados para altas temperaturas (que ascienden incluso a 1000 °C) y presiones de operación.



**Figura 2.7. Mecanismos de colección de partículas en un ciclón [8].**

Los ciclones son adecuados para separar partículas con diámetros mayores de 5  $\mu\text{m}$ ; aunque partículas muchos más pequeñas, en ciertos casos, pueden ser separadas. Estos presentan eficiencias mayores que la cámara de sedimentación gravitacional y eficiencias menores que los filtros.

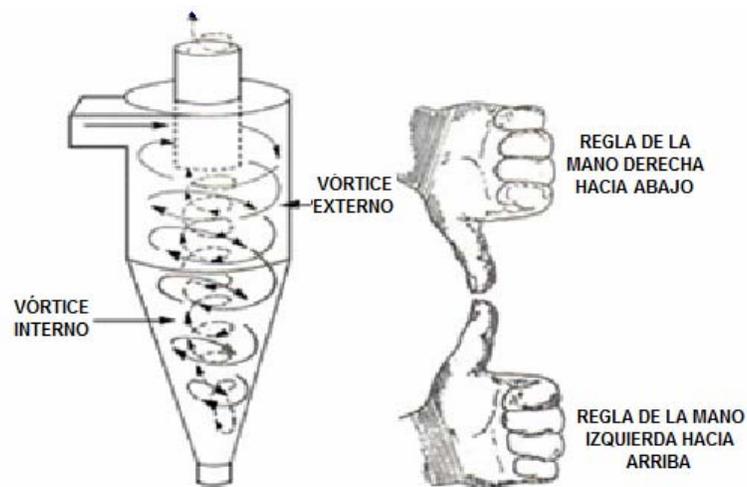
La fuerza centrífuga generada por los giros del gas dentro del ciclón puede ser mucho mayor que la fuerza gravitacional, ya que la fuerza centrífuga varía en magnitud dependiendo de la velocidad de giro del gas y del radio de giro.

Teóricamente el aumento de la velocidad de entrada al ciclón implicaría un aumento de la fuerza centrífuga y por lo tanto un aumento de la eficiencia, sin embargo, velocidades de entrada muy altas generan la resuspensión de material particulado de las paredes internas del ciclón, lo cual disminuye la eficiencia del ciclón; adicionalmente aumentar la velocidad de entrada implica mayor consumo de energía [8].

### 2.8.1.1 Principio de funcionamiento del ciclón

En un ciclón, la trayectoria del gas comprende un doble vórtice, en donde el gas dibuja una espiral descendente en el lado externo y ascendente en el lado interno. En la Fig. 2.8 se ilustran dichos vórtices.

En un ciclón el gas entra en la cámara superior tangencialmente y desciende en espirales hasta el ápice de la sección cónica; luego asciende en un segundo espiral, con diámetro más pequeño, y sale por la parte superior a través de un ducto vertical centrado. Los sólidos se mueven radialmente hacia las paredes, se deslizan por las paredes, y son recogidos en la parte inferior.



**Figura 2.8. Vórtices en el ciclón [8].**

El diseño apropiado de la sección cónica del ciclón obliga al cambio de dirección del vórtice descendente, el vórtice ascendente tiene un radio menor, lo que aumenta las velocidades tangenciales; en el cono se presenta la mayor colección de partículas, especialmente de las partículas pequeñas al reducirse el radio de giro [8].

### 2.8.1.2 Familia de ciclones

Los ciclones son equipos de control de material particulado bastante estudiado, el diseño de un ciclón se basa normalmente en familias de ciclones que tienen proporciones definidas.

Las principales familias de ciclones de entrada tangencial son:

- Ciclones de alta eficiencia
- Ciclones convencionales
- Ciclones de alta capacidad

Los márgenes de la eficiencia de remoción para los ciclones, están con frecuencia basados en las tres familias de ciclones, es decir, convencional (Ver Tabla 2.3), alta eficiencia (Ver Tabla 2.4) y alta capacidad (Ver Tabla 2.5).

Los ciclones de alta eficiencia están diseñados para alcanzar mayor remoción de las partículas pequeñas que los ciclones convencionales. Los ciclones de alta eficiencia pueden remover partículas de 5  $\mu\text{m}$  con eficiencias hasta del 90%, pudiendo alcanzar mayores eficiencias con partículas más grandes. Estos ciclones tienen mayores caídas de presión, lo cual requiere de mayores costos de energía para mover el gas sucio a través del ciclón [8].

Por lo general, el diseño del ciclón está determinado por una limitación especificada de caída de presión, en lugar de cumplir con alguna eficiencia de control especificada. Los ciclones de alta capacidad están garantizados solamente para remover partículas mayores de 20  $\mu\text{m}$ , aunque en cierto grado ocurra la colección de partículas más pequeñas. Se ha reportado que los multiciclones han alcanzado eficiencias de recolección de 80 a 95 % para partículas de 5  $\mu\text{m}$ .

**Tabla 2.3. Características de los ciclones convencionales [8]**

| <b>Dimensión</b>               | <b>Nomenclatura</b> | <b>Tipo de Ciclón</b> |              |                        |             |
|--------------------------------|---------------------|-----------------------|--------------|------------------------|-------------|
|                                |                     | <b>Lapple</b>         | <b>Swift</b> | <b>Peterson-Whitby</b> | <b>Zenz</b> |
| Diámetro del ciclón            | Dc/Dc               | 1,0                   | 1,0          | 1,0                    | 1,0         |
| Altura de Entrada              | a/Dc                | 0,5                   | 0,5          | 0,583                  | 0,5         |
| Ancho de Entrada               | b/Dc                | 0,25                  | 0,25         | 0,208                  | 0,25        |
| Altura de Salida               | s/Dc                | 0,625                 | 0,6          | 0,583                  | 0,75        |
| Diámetro de Salida             | Ds/Dc               | 0,5                   | 0,5          | 0,5                    | 0,5         |
| Altura parte Cilíndrica        | h/Dc                | 2,0                   | 1,75         | 1,333                  | 2,0         |
| Altura parte Cónica            | z/Dc                | 2,0                   | 2,0          | 1,837                  | 2,0         |
| Altura Total de Ciclón         | H/Dc                | 4,0                   | 3,75         | 3,17                   | 4,0         |
| Diámetro Salida Partículas     | B/Dc                | 0,25                  | 0,4          | 0,5                    | 0,25        |
| Factor de Configuración        | G                   | 402,88                | 381,79       | 342,29                 | 425,41      |
| Número de Cabezas de Velocidad | NM                  | 8,0                   | 8,0          | 7,76                   | 8,0         |
| Número de Vórtices             | N                   | 6,0                   | 5,5          | 3,9                    | 6,0         |

**Tabla 2.4. Características de los ciclones de alta eficiencia [8]**

| Dimensión                      | Nomenclatura | Tipo de Ciclón |        |           |
|--------------------------------|--------------|----------------|--------|-----------|
|                                |              | Stairmand      | Swift  | Echeverri |
| Diámetro del ciclón            | Dc/Dc        | 1,0            | 1,0    | 1,0       |
| Altura de Entrada              | a/Dc         | 0,5            | 0,44   | 0,5       |
| Ancho de Entrada               | b/Dc         | 0,2            | 0,21   | 0,2       |
| Altura de Salida               | s/Dc         | 0,5            | 0,5    | 0,625     |
| Diámetro de Salida             | Ds/Dc        | 0,5            | 0,4    | 0,5       |
| Altura parte Cilíndrica        | h/Dc         | 1,5            | 1,4    | 1,5       |
| Altura parte Cónica            | z/Dc         | 2,5            | 2,5    | 2,5       |
| Altura Total de Ciclón         | H/Dc         | 4,0            | 3,9    | 4,0       |
| Diámetro Salida Partículas     | B/Dc         | 0,375          | 0,4    | 0,375     |
| Factor de Configuración        | G            | 551,22         | 698,65 | 585,71    |
| Número de Cabezas de Velocidad | NM           | 6,4            | 9,24   | 6,4       |
| Número de Vórtices             | N            | 5,5            | 6,0    | 5,5       |

**Tabla 2.5. Características de los ciclones de alta capacidad [8]**

| Dimensión                      | Nomenclatura | Tipo de Ciclón |       |
|--------------------------------|--------------|----------------|-------|
|                                |              | Stairmand      | Swift |
| Diámetro del ciclón            | Dc/Dc        | 1,0            | 1,0   |
| Altura de Entrada              | a/Dc         | 0,75           | 0,8   |
| Ancho de Entrada               | b/Dc         | 0,375          | 0,35  |
| Altura de Salida               | s/Dc         | 0,875          | 0,85  |
| Diámetro de Salida             | Ds/Dc        | 0,75           | 0,75  |
| Altura parte Cilíndrica        | h/Dc         | 1,5            | 1,7   |
| Altura parte Cónica            | z/Dc         | 2,5            | 2,0   |
| Altura Total de Ciclón         | H/Dc         | 4,0            | 3,7   |
| Diámetro Salida Partículas     | B/Dc         | 0,375          | 0,4   |
| Factor de Configuración        | G            | 29,79          | 30,48 |
| Número de Cabezas de Velocidad | NM           | 8,0            | 7,96  |
| Número de Vórtices             | N            | 3,7            | 3,4   |

La Fig. 2.9 identifica las principales dimensiones del ciclón de entrada tangencial. El diámetro del ciclón (Dc) identifica la dimensión básica de diseño, todas las demás dimensiones simplemente son una proporción del diámetro del ciclón.

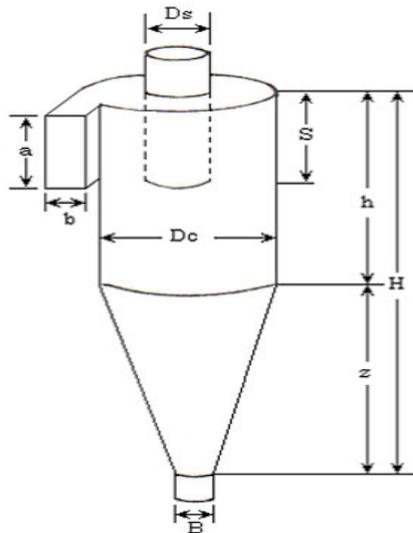


Figura 2.9. Dimensiones del ciclón [8].

### 2.8.1.3 Cálculo de eficiencias

La Fig. 2.10 presenta una comparación gráfica de los resultados experimentales con las predicciones teóricas de las eficiencias de colecciones de material particulado en función del tamaño de las partículas.

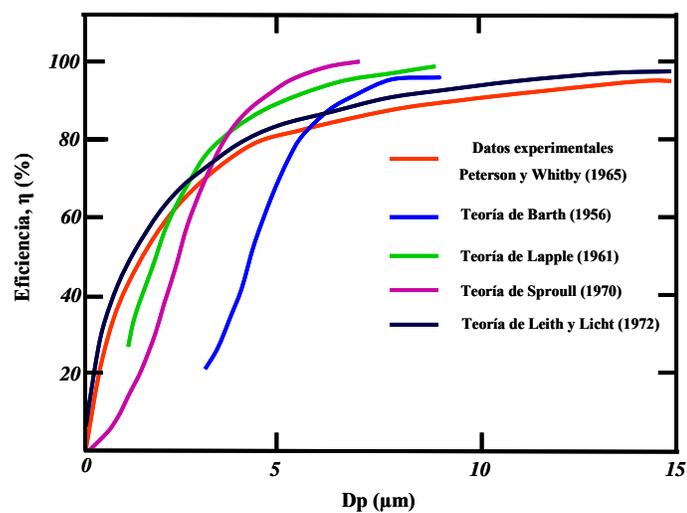


Figura 2.10. Eficiencia de colección del ciclón [8].

La eficiencia fraccional por tamaño de partículas se calcula con la Ec. (2.4):

$$\eta_i = 1 - e \left[ -2 \left( \frac{GT_i Q(n+1)}{Dc^3} \right)^{\frac{0.5}{(n+1)}} \right] \quad (2.4)$$

donde:

$\eta_i$  = Eficiencia fraccional por intervalos de tamaño

$G$  = Factor de configuración del ciclón

$T_i$  = Tiempo de relajación para cada partícula, (s)

$Q$  = Caudal de gas, (m<sup>3</sup>/s)

$D_c$  = Diámetro del ciclón, (m)

$n$  = Exponente del vórtice del ciclón

El factor  $G$  esta relacionado con las proporciones del ciclón y  $T_i$  agrupa características del material particulado y del gas de arrastre.

La eficiencia total se calcula realizando la sumatoria del producto de las eficiencias fraccionales por la masa fraccional.

$$\eta_T = \sum \eta_i m_i \quad (2.5)$$

donde:

$\eta_T$  = Eficiencia total

$\eta_i$  = Eficiencia fraccional

$m_i$  = Porcentaje másico, (%)

Para utilizar las Ecs. (2.4) y (2.5) se debe estar seguro de que el ciclón no presenta resuspensión, ya que el valor real de la eficiencia sería mucho menor al

estimado por estas ecuaciones. La Ec. (2.4) es la eficiencia "al vacío" o sin carga de partículas.

#### 2.8.1.4 Factor de configuración "G"

El factor de configuración "G" resulta de relacionar algunas proporciones normalizadas por el diámetro del ciclón, la Ec. (2.6) presenta el factor de configuración:

$$G = \frac{8Kc}{(KaKb)^2} \quad (2.6)$$

donde:

$Kc$  = Factor adimensional de las proporciones volumétricas del ciclón

$Ka$  = Relación entre la altura de la entrada y el diámetro del ciclón ( $a/Dc$ )

$Kb$  = Relación entre el ancho de la entrada y el diámetro del ciclón ( $b/Dc$ )

El factor adimensional de las proporciones volumétricas del ciclón ( $Kc$ ) se calcula con la Ec. (2.7).

$$Kc = \frac{\left( V_{sc} + \frac{V_R}{2} \right)}{Dc^3} \quad (2.7)$$

donde:

$V_{sc}$  = Volumen evaluado sobre la salida del ciclón, ( $m^3$ )

$V_R$  = Volumen evaluado sobre la longitud natural del ciclón ( $m^3$ ), siempre que se cumpla la siguiente condición:

$$L < (H - S) \quad (2.8)$$

donde:

L = Longitud natural del ciclón, (m)

H = Altura total del ciclón, (m)

S = Altura de la salida, (m)

La longitud natural del ciclón corresponde a la longitud necesaria para iniciar el vórtice ascendente tomada desde la altura superior del ciclón, se puede calcular con la Ec. (2.9). La longitud natural del ciclón (L) es común para cada familia de ciclones.

$$L = 2.3D_s \sqrt[3]{\frac{D_c^2}{ab}} \quad (2.9)$$

donde:

$D_s$  = Diámetro de salida del ciclón, (m)

El volumen evaluado sobre la salida del ciclón  $V_{sc}$  se determina con la Ec. (2.10):

$$V_{sc} = \frac{\pi}{4} \left( S - \frac{a}{2} \right) (D_c^2 - D_s^2) \quad (2.10)$$

El volumen del ciclón evaluado sobre la longitud natural  $V_R$  se calcula con la Ec. (2.11):

$$V_R = \frac{\pi}{4} Dc^2 (h - S) + \frac{\pi}{12} Dc^2 (L + S - h) \left[ 1 + \frac{K_L}{Dc} + \left( \frac{K_L}{Dc} \right)^2 \right] - \frac{\pi}{4} Ds^2 L \quad (2.11)$$

Donde:  $K_L$  se denomina el factor de dimensiones lineales y se calcula con la Ec. (2.12):

$$K_L = D_c - (D_c - B) \left[ \frac{S + L - h}{z} \right] \quad (2.12)$$

donde:

$B$  = Diámetro de Salida de las Partículas del ciclón, (m)

$h$  = Altura de la parte Cilíndrica del ciclón, (m)

$z$  = Altura de la parte Cónica del ciclón, (m)

### 2.8.1.5 Tiempo de relajación “T”

El tiempo de relajación (T) es el tiempo necesario para que una partícula alcance la velocidad terminal de caída y se evalúa con la Ec. (2.13):

$$T_i = \frac{\rho_p D_p^2}{18\mu} \quad (2.13)$$

donde:

$\rho_p$  = Densidad de la partícula, (kg/m<sup>3</sup>)

$D_p$  = Diámetro de la partícula, (m)

$\mu$  = Viscosidad del gas, (kg/ms)

### 2.8.1.6 Exponente del vórtice “n”

El exponente del vórtice (n) resulta de relacionar la velocidad tangencial y el radio de giro de un movimiento en forma de vórtice. Los análisis teóricos revelan que el exponente “n” debe ser igual a 1,0 en ausencia de fricción de pared (vórtice libre). No obstante, las mediciones reales señalan que el exponente “n” puede variar de 0,5 a

0,7 de acuerdo con el tamaño del ciclón y la temperatura; una ecuación empírica muy utilizada es la Ec. (2.14):

$$n = 1 - \left(1 - 0.67D_c^{0.14}\right) \left[\frac{T}{283}\right]^{0.3} \quad (2.14)$$

donde:

$n$  = Exponente del vórtice (valor adimensional)

$D_c$  = Diámetro del ciclón, (m)

$T$  = Temperatura del gas, (K)

### 2.8.1.7 Número de giros

Otro modelo para estimar la eficiencia de remoción de partículas en los ciclones, es la que se basa en el número de giros o vórtices externos que presenta la corriente gaseosa en el interior del ciclón. El número de giros o vórtices puede ser estimado de las dimensiones del ciclón, debido a que estos dependen de la altura de cada uno de los vórtices y de la longitud del ciclón. El número de giros viene dado por:

$$N = \frac{1}{a} \left[ h + \frac{z}{2} \right] \quad (2.15)$$

Si se asume un flujo mezclado, la expresión que relaciona la eficiencia de remoción con los parámetros del ciclón y las condiciones de operación es:

$$\eta_i = 1 - e \left[ \frac{-\pi N \rho_p D_p V_i}{9 \mu b} \right] \quad (2.16)$$

donde:

$\eta_i$  = Eficiencia fraccional por intervalos de tamaño

$V_i$  = Velocidad de entrada del gas en el ciclón, (m/s)

Este modelo indica la fuerte dependencia que tiene la eficiencia con el diámetro de las partículas, el número de giros o vórtices y la velocidad de entrada.

Sin embargo, el modelo predice un valor finito para el diámetro de la partícula (tamaño crítico), mientras que la evidencia experimental muestra que la eficiencia se aproxima asintóticamente con el incremento del diámetro de la partícula. El diámetro crítico de la partícula ( $Dp_{critico}$ ) está dado por:

$$Dp_{critico} = \sqrt{\frac{9\mu b}{\pi N \rho_p V_i}} \quad (2.17)$$

La eficiencia obtenida por cualquiera de estos métodos (Ecs. (2.4) y (2.16)) es la eficiencia "al vacío", es decir, la que se obtendría separando partículas aisladas. En la práctica, la interacción entre partículas hace que la eficiencia aumente con la concentración de partículas. Por lo tanto, las Ec. (2.4) y (2.16) son válidas solamente para concentraciones de partículas que se encuentran por debajo de  $2,0 \text{ g/m}^3$ , medidas a condiciones de referencia.

La eficiencia de colección de los ciclones varía en función del tamaño de la partícula y del diseño del ciclón. La eficiencia de ciclones generalmente, aumenta con:

- a) El tamaño de partícula y/o la densidad
- b) La velocidad en el conducto de entrada
- c) La longitud del cuerpo del ciclón

- d) El número de revoluciones del gas en el ciclón
- e) La proporción del diámetro del cuerpo del ciclón al diámetro del conducto de salida del gas
- f) La concentración de las partículas.
- g) El pulimento de la superficie de la pared interior del ciclón.

La eficiencia del ciclón disminuye con los aumentos en:

- a) La viscosidad del gas
- b) El diámetro del cuerpo del ciclón
- c) El diámetro de la salida del gas
- d) El área del conducto de entrada del gas
- e) La densidad del gas

Un factor común que contribuye a la disminución de las eficiencias de control en los ciclones es el escape de aire en el conducto de salida del polvo.

### **2.8.1.8 Velocidad de saltación**

En los ciclones, la velocidad de entrada es un parámetro fundamental, velocidades muy bajas permiten la sedimentación de partículas y neutralizan el efecto de la fuerza centrífuga generando disminución en la eficiencia de colección; y velocidades muy altas pueden resuspender partículas previamente colectadas, disminuyendo también la eficiencia. La experiencia indica que la velocidad de entrada al ciclón debe situarse en el intervalo de 15,2 a 27,4 m/s.

Kalen y Zenz (1974) [8] propusieron la existencia de una "velocidad de saltación" en el ciclón para explicar porque la eficiencia de colección algunas veces descendía con incrementos en la velocidad de entrada. De lo anterior se puede

observar que lo ideal es trabajar con velocidades de entrada lo suficientemente altas para aprovechar el efecto de la aceleración centrífuga, sin sobrepasar la velocidad que implica resuspensión del material ya colectado. La correlación semiempírica para la velocidad de saltación ( $V_s$ ) es:

$$V_s = \frac{4,913WK_b^{0,4}D_c^{0,067}\sqrt[3]{V_i^2}}{\sqrt[3]{1-K_b}} \quad (2.18)$$

donde:

$V_s$  = Velocidad de saltación, (m/s)

$V_i$  = Velocidad de entrada del gas en el ciclón, (m/s)

$W$  = Velocidad equivalente, (m/s)

La velocidad equivalente ( $W$ ) se evalúa a través de la siguiente ecuación:

$$W = \sqrt[3]{\frac{4g\mu(\rho_p - \rho)}{3\rho^2}} \quad (2.19)$$

donde:

$\rho_p$  = Densidad de la partícula, (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho$  = Densidad del gas portador, (kg/m<sup>3</sup>)

$\mu$  = Viscosidad del gas portador, (kg/ms)

Por lo tanto la velocidad de saltación es función de las propiedades de las partículas y del fluido, así como de las dimensiones del ciclón.

Numerosos investigadores han explorado experimentalmente la velocidad óptima de entrada al ciclón; Kalen y Zenz [8] desarrollaron correlaciones

experimentales entre la relación velocidad de entrada/velocidad de saltación y la eficiencia del ciclón, encontrando lo siguiente:

- La máxima eficiencia de colección ocurre cuando la velocidad de entrada ( $V_i$ ) es 1,25 veces la velocidad de saltación ( $V_s$ ).
- Cuando la velocidad de entrada ( $V_i$ ) es mayor a 1,35 veces la velocidad de saltación ( $V_s$ ) se produce resuspensión del material ya capturado.

#### **2.8.1.9 Estimativa de la caída de presión**

La caída de presión es un parámetro importante debido a que relaciona directamente los costos de operación. La caída de presión en un ciclón puede deberse a las pérdidas a la entrada y salida, y pérdidas de energía cinética y fricción en el ciclón.

Las eficiencias de remoción en un ciclón se pueden aumentar al incrementar las velocidades de entrada, pero esto también incrementa las caídas de presión. A mayor pérdida de presión aumentan los requerimientos de potencia en el ciclón y por lo tanto mayor consumo de energía. Existen diferentes ecuaciones para calcular la pérdida de presión en un ciclón.

Las pérdidas de presión menores a 2488,16 Pa (10 pulg H<sub>2</sub>O) son generalmente aceptadas.

Una de las ecuaciones para calcular la pérdida de presión en un ciclón es la desarrollada por Shepherd y Lapple [8]:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho V_i^2 N_H \quad (2.20)$$

donde:

$\Delta P$  = Caída de presión en el ciclón, (Pa)

$\rho$  = Densidad del gas portador, (kg/m<sup>3</sup>)

$V_i$  = Velocidad de entrada del gas en el ciclón, (m/s)

$N_H$  = Número de cabezas de velocidad a la entrada del ciclón

El número de cabezas de velocidad a la entrada del ciclón se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$N_H = K \frac{ab}{D_s^2} \quad (2.21)$$

donde:

$K$  = Constante la cual toma el valor de 16 para entrada tangencial

La pérdida de presión en un ciclón depende del cuadrado de la velocidad de entrada, por lo tanto, a mayor velocidad de entrada mayor pérdida de presión; lo anterior implica en la práctica el sacrificar un poco de eficiencia para disminuir los requerimientos de energía.

Aunque otras ecuaciones han sido formuladas a partir de consideraciones teóricas, se ha encontrado que generalmente no son tan precisas como la ecuación de Shepherd y Lapple [8], la cual es considerada como la más útil para calcular la caída de presión.

## 2.9 SEPARACIÓN DE LA ARENA

La arena o los sólidos por lo general no constituyen un problema de importancia en la producción de hidrocarburos, esto es así porque los volúmenes que se producen son tan bajos que los equipos y la planta están en capacidad de “tolerarlo”. Sin embargo, una producción continua de sólidos cambia tal situación y entonces la separación de la arena se torna en uno de los aspectos claves en la estrategia de manejo de la arena [3]. El tránsito de los sólidos a través del sistema tiene un impacto significativo sobre su rendimiento y es capaz de conllevar a algunos de los problemas que se citan a continuación:

- Incremento en el consumo de energía eléctrica a causa de las pérdidas por fricción
- Mayor desgaste en los equipos debido a los sólidos entrampados en los fluidos
- Mayor riesgo de erosión
- Pérdida potencial de la capacidad de contener los hidrocarburos en caso de falla o rotura de tuberías
- Pérdida de productividad e incremento en el tiempo de parada de los equipos y de la planta
- Bloqueo de los recipientes y baja eficiencia del proceso

Como resultado de lo anterior, el dilema más importante durante la fase de desarrollo del campo es si las instalaciones deben diseñarse con “tolerancia adicional” por concepto de producción de sólidos o no. Tal decisión es relativamente simple en los yacimientos no consolidados o en las formaciones en las cuales es claro que ocurrirá producción de sólidos y arena.

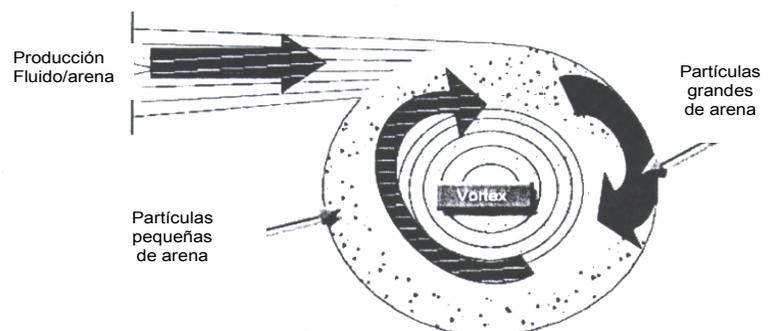
La solución más sencilla parece ser emplear equipos para el control de sólidos en el fondo del hueco en caso de que exista alguna señal o signo de que la producción de sólido podría ser un problema. Sin embargo, la mayoría de los métodos para el

control de arena tiene un efecto negativo en la productividad del pozo y en ese caso puede ser preferible tratar de “manejar” el problema en la superficie [3].

### 2.9.1 Principios de la separación de arena

Los dos principios actualmente empleados en la separación de sólidos son la gravedad y la fuerza centrífuga. La gravedad se emplea en los recipientes separadores permitiendo el asentamiento de las partículas en el tanque, lo cual es una función de parámetros tales como tamaño y peso de la partícula, densidad y viscosidad del fluido. Los tiempos para el asentamiento y las velocidades se determinan aplicando la Ley de Stokes representada por la Ec. (2.3).

La fuerza centrífuga se emplea en los ciclones para separar fluidos, gases y sólidos. Los ciclones operan mediante la fuerza centrífuga la cual “empuja” a los componentes más densos hacia la pared exterior de un elemento cónico o cilíndrico. Las partículas más densas prosiguen su tránsito hacia abajo debido a su peso y a la fuerza centrífuga conjuntamente con los fluidos, y esto se conoce como el “underflow” del ciclón. El vórtice que se crea en la parte interna del cono transporta los fluidos y a las partículas de arena de menor tamaño hacia arriba buscando el flujo sobrenadante o “overflow”. La Fig. 2.11, ilustra el principio de separación por la fuerza centrífuga.

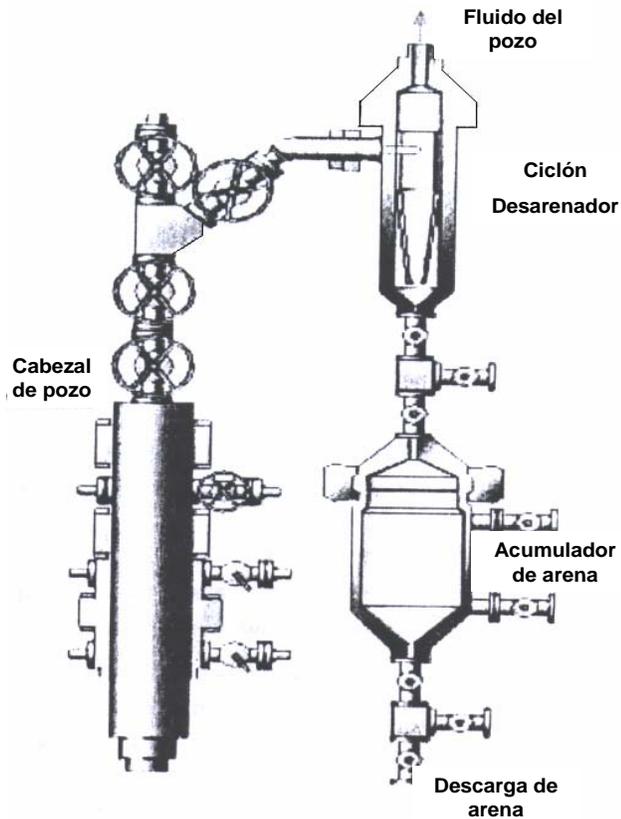


**Figura 2.11. Separación de sólidos usando fuerza centrífuga [3].**

### 2.9.1.1 Separación de la arena y el cabezal del pozo

La producción de arena ocasiona el mayor daño erosivo a medida que los hidrocarburos alcanzan la superficie, donde hay presiones menores que permiten la expansión del gas y aumentan la velocidad del fluido al salir del árbol de producción (production tree). En este caso es cuando la erosión causa problemas de importancia en las válvulas, tuberías y aún más importante, en las válvulas estranguladoras o “chokes”. Lo anterior es especialmente importante en los pozos con levantamiento por gas en los cuales el GOR original bien podría no aumentar de manera significativa las velocidades en la superficie, pero la inyección de gas para levantar los hidrocarburos sí aumentará estas velocidades a medida que el gas se expande en las cercanías de la superficie. La separación sólido – líquido en el cabezal del pozo se efectúa por medio de hidrociclones, los mismos consisten en recipientes compactos que hacen que las fuerzas centrífugas obliguen a las partículas de arena a desplazarse hacia la pared externa del recipiente. Una vez que las mismas están en la pared externa estas transitarán hacia abajo para su transporte una vez que ocurra la separación. La Fig.2.12 ilustra un típico cabezal de pozo para separación de arena (de-sander).

A menudo la falta de espacio restringe el uso de estos equipos, sin embargo, los mismos deben emplearse siempre que se pueda, ya que evitan problemas recurrentes como la erosión de los chokes. Quizás el problema más común asociado con este tipo de equipos es su taponamiento periódico que ocurre en función del volumen y el modo de producción de la arena.



**Figura 2.12. Sistema de separación de sólidos en el cabezal del pozo [3].**

### 2.9.1.2 Separación de arena en recipientes y tanques

Las partículas de arena que ingresan en un recipiente de separación de tres etapas tienden a asentarse a causa de las bajas velocidades que permiten la separación arena-agua. En la práctica las reglas que se indican a continuación aplican:

- En recipientes en los cuales los tiempos de residencia fueren  $>$  a 5 minutos la mayoría de la arena se asentará, asumiendo que la viscosidad del fluido es relativamente baja.

- En los separadores en los cuales los tiempos de residencia fueren  $<$  a 5 minutos y la viscosidad de los fluidos fuere mayor, se da por hecho que algo de arena se pasará y será arrastrada “carried over” con los hidrocarburos.

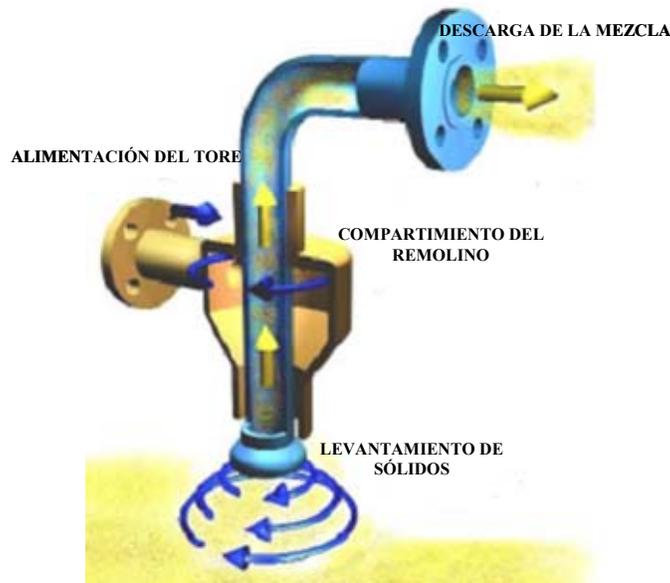
El pronóstico y la determinación de los tiempos para el asentamiento y los volúmenes son importantes, ya que esto proporciona una indicación de los problemas que se presentarán aguas abajo de los tanques separadores. Si la implantación se efectúa apropiadamente, esto permite al personal de producción planificar oportunamente operaciones como el mantenimiento de recipientes o llevar a cabo cualesquiera modificaciones que fueren necesarias [3].

### **2.9.1.3 Separación de la arena utilizando ciclones**

Gracias a la acción de la fuerza centrífuga las partículas de arena son “empujadas” hacia fuera del recipiente, quedando el fluido y a veces las partículas más pequeñas en el centro del vórtice para pasar por el “overflow”. En los diseños actuales como el de Tore technology (Ver Fig. 2.13), los ciclones se emplean para separar la arena y su posterior transporte desde el recipiente de separación.

Los ciclones tienen múltiples aplicaciones en la industria, sin embargo algunas de sus limitaciones son:

- Costo (inicial y OPEX [Desembolsos Operacionales])
- La metalurgia y la resistencia a la erosión del sistema
- El tamaño y los volúmenes de las partículas objeto de la separación pueden hacer que el equipo sea demasiado voluminoso
- Mantenimiento



**Figura 2.13. Sistema tipo hidrociclón. (TORE) [3].**

## **2.9.2 Remoción de la arena de los recipientes y tuberías**

En la actualidad se emplean dos métodos para remoción de arena en los recipientes separadores, como son: el lavado de la arena por medio de chorro de agua a presión y la remoción directa por medio de la “succión” generada por los hidrociclones. Otra opción es la limpieza “manual” de los tanques y los recipientes separadores, la cual todavía permanece en uso. Pero en la mayoría de los casos, las instalaciones originales carecen de equipos e instalaciones para la remoción de arena y cuando se hace evidente este problema, se hace necesario activar un programa de re-equipamiento y mejoras, lo cual acarrea costos [3].

### **2.9.2.1 Chorro de agua a presión**

En los tanques horizontales y cilíndricos se colocan toberas horizontales en el fondo de estos recipientes para remover las partículas de arena de estos. Se bombea

agua a través de las toberas generándose un chorro que penetra progresivamente en la “pila” de arena asentada. Conforme se “fluidiza” la pila se va abriendo un canal, el cual eventualmente colapsará y esto a su vez incorpora más arena en el área de alcance del chorro. A fin de alcanzar la mayor superficie posible de la arena asentada en el fondo del tanque, las toberas se colocan en paralelo y muy cercanas unas de otras. A medida que el chorro de agua penetra en la arena asentada, las partículas fluidizadas fluyen hacia el drenaje del tanque, este drenaje las conducirá a una instalación para su procesamiento/disposición en el área de la planta. Los principales factores a considerar en el diseño de un sistema de lavado de arena son:

- Las secciones de lavada en el recipiente
- La configuración del recipiente
- El tamaño de la tobera, su cantidad y ubicación
- El sistema de drenaje

El factor crítico que afecta la remoción efectiva de arena con chorro de agua a presión es la fluidización de la arena asentada. Y eso es el momento que el agua genera a medida que esta penetra en los sólidos asentados.

Empíricamente se ha determinado que un factor de fluidización de 0,001 es el valor óptimo para las partículas de arena.

Entre otras consideraciones en el diseño de un sistema de chorro de agua a presión se incluye la recolección de arena a través de bandejas para evitar un problema potencial de erosión a causa del impacto del agua en la superficie del recipiente. Los parámetros presentados en la Tabla 2.6 se emplean en el diseño de los sistemas de chorro a presión en los separadores horizontales [3].

**Tabla 2.6. Parámetros de diseño para sistemas de chorro de agua en separadores horizontales**

| Parámetros  | Designación de regla                  | Referencias  | Observaciones   |
|---|---------------------------------------|--|---|
| Longitud de la sección de la colada.                  | 3D                                    | 0.85 D del máximo del drenaje.                     | La sección más larga que se diseñará primero.   |
| Altura de la presa de la arena.                       | 0.0085D                               | 150 mm mínimo.                                     | La altura no es crítica.  |
| Sistema de colado de la tubería.                      | ---                                   | Escoja los múltiples del múltiple.                 | Localizado paralelo a la superficie del tanque.   |
| Tipo de las bandejas de la arena.                     | Tubería invertida, corte de la mitad. | Una vez por la sección de la colada.               | Usar V invertido también.   |
| Espaciamiento de la ranura de la bandeja de la arena. | 250 mm                                | Ranuras triangulares.                              | Ranuras más grandes para las cantidades muy altas solamente.                                      |
| Colocación de la bandeja de la arena.                 | ---                                   | Cualquier lado de la línea central del recipiente. | Para el recipiente grande donde $D > 3$ m. El tipo de arena y su cohesión cambiará la colocación. |
| Colocación del inyector.                              | 0.028D de la pared                    | Cohesión de la arena.                              | su cohesión cambiará la colocación.   |
| Tipo del inyector.                                    | Interno, externo y drenaje.           | Ángulo bajo del ventilador, alta velocidad.        | Muchos tipos disponibles.   |
| Diámetro del inyector.                                | [ 4 – 12] mm                          | ---  | Depende de un número de factores.   |
| Drene los inyectores.                                 | > 76 mm                               | ---  | Salida de la velocidad < 3 m/seg  |
| Erosión.  | ---                                   | Ángulo de choque.                                  | El revestimiento pudo ser utilizado.  |

El tipo de forma de la tobera es muy importante. Los separadores grandes poseen “water headers” y tienen instaladas hasta tres filas de toberas. Los tres parámetros críticos para la seleccionar una tobera son:

- “Stand off” o distancia de separación
- Alcance del chorro
- El abanico y ángulo de impacto

El diagrama de la Fig. 2.14 ilustra los dos tipos de toberas más comunes en los sistemas de lavado de arena en los separadores.



**Figura 2.14. Toberas de cono plano y cono completo [3].**

### **2.9.2.2 Remoción de sólidos de las tuberías y líneas de flujo**

Los depósitos de arena (Ver Fig. 2.15) en las tuberías tienden a causar problemas y se hace necesario su remoción y limpieza a lo largo de grandes distancias. Estas operaciones son complicadas y requieren para ello una mezcla de fluidos y de equipos mecánicos para lograr la remoción efectiva de la arena en las

tuberías. Algunas de las principales consecuencias que generan los depósitos de arena en las tuberías son:

- Incremento de la presión a causa de la reducción del área de flujo
- Incremento de las presiones de operación y de los requerimientos de Hp (alta presión)
- Incremento de las velocidades de corrosión ya que los asentamientos de arena se convierten en puntos potenciales de corrosión
- Incremento en el costo de mantenimiento a causa del desgaste de equipos y limpieza de tuberías



**Figura 2.15. Limpieza de arena en Oleoductos y tuberías.**

En términos de un manejo efectivo de arena y remoción de sólidos de las tuberías es crítico poseer un entendimiento profundo en relación con los tipos de sólidos, fluidos y el uso que se hace de los sistemas de tuberías específicos. Los sistemas que presentan pequeños depósitos de sólidos pueden operarse con un mantenimiento y operaciones de remoción de sólidos mínimos. Ahora bien, las tuberías con presencia de grandes concentraciones de sólidos en movimiento en los fluidos de producción y en las cuales el mantenimiento es limitado requerirán de una

cantidad de trabajo considerable para llevarlas de nuevo a sus condiciones operacionales [3].

### **2.9.2.3 Métodos mecánicos para remoción de sólidos en tuberías**

Normalmente se emplean tapones “cochinos” mecánicos para la remoción de los sólidos de las tuberías y en algunos casos también se usan fluidos en el proceso de limpieza. Lo anterior involucra un empleo de una combinación de fluidos y cochinos dependiendo de los requerimientos de limpieza. Es particularmente importante utilizar el primer pase de cochino para aprovechar de recolectar información sobre la severidad de los depósitos de sólidos en la tubería.

### **2.9.2.4 Diseño para remoción de sólidos en tuberías por medio de sistemas de cochinos**

En su mayor parte, las operaciones de limpieza se diseñan para llevarse a cabo en dos etapas. La primera etapa consiste en lanzar un cochino mecánico para “probar” las condiciones en la tubería. La segunda consiste en lanzar una secuencia de cochinos para lograr la remoción progresiva de los sólidos presentes en la tubería. La primera etapa está compuesta por un solo cochino mecánico, el cual se denomina como el cochino primario o primer cochino, el mismo se emplea para conocer y evaluar el grado de acumulación de sólidos en la tubería y sus características, para todo efecto es una corrida de prueba que proporcionará cuantiosa información. Este primer cochino se utiliza para:

- Evaluar los volúmenes de sólidos asentados en la tubería
- Validar las simulaciones hidráulicas de flujo y caída de presión
- Identificar los lugares con potencial para asentamiento de sólidos
- La topografía de la tubería

➤ Tomar muestras

El primer cochino normalmente es hecho de espuma y los mismos se fabrican en varias configuraciones y densidades, ideal para hacerlo pasar por los dobleces y las restricciones. No son muy efectivos en la remoción de sólidos y tienden a romperse con facilidad, por ello es que se prefieren para ser el primer cochino. En algunos casos se equipan con una palanca calibradora la cual le da estructura y diámetro fijo al cochino.

La segunda etapa involucra la utilización de cochinos de varios diámetros y configuraciones. Un aspecto crítico es monitorear la tasa de remoción de sólidos después de cada corrida la cual sirve para indicar su efectividad, además, en algunos casos, como una señal para cambiar la configuración del cochino cuando se logra remover una muy poca cantidad de sólidos. Los cochinos de espuma raramente se usan en la segunda etapa, se prefiere emplear otros cochinos con un diámetro mayor y una geometría flexible como son los cochinos de copas (goma) [3].

Los cochinos de copa poseen un cuerpo rígido el cual está rodeado por las copas que a su vez hacen de sello y mejoran la capacidad para la remoción de sólidos. Sin embargo, a causa de su estructura rígida no son muy buenos para recorrer tuberías que presenten geometrías complejas o para la parte inicial de la segunda etapa en la cual existen volúmenes considerables de sólidos en la tubería. Los cochinos de discos presentan una construcción mucho más rígida en comparación con los de copas y normalmente se usan en las últimas etapas del proceso de limpieza. Gracias a su configuración son mucho más eficientes en la remoción de sólidos que los cochinos de copas [3].

En la Tabla 2.7 se describen las limitaciones para el su uso de los diferentes tipos de cochinos:

**Tabla 2.7. Reglas generales de selección del tipo de cochinos [3]**

| <b>Tipo</b>   | <b>Pauta</b>  |
|---------------|---|
| <b>Espuma</b> | Utilizado en la primera etapa con el primer cochino. También utilizado en la segunda etapa con tolerancias más cercanas. Bueno para las geometrías complejas (restricciones y curvas). También utilizado para el retiro de los líquidos en tuberías. Utilizado individualmente. |
| <b>Copa</b>   | Buenas características de lacre. No utilizar en geometrías complejas. Tiende a puentear algo del sólido colocado. Se puede utilizar como los dispositivos para limpiar. Utilizado individualmente.  |
| <b>Disco</b>  | Una estructura mucho más rígida particularmente la base. Eficacia muy alta del retiro de los sólidos. Utilizado individualmente.  |

Los cochinos inteligentes o cochinos con capacidades o funciones especiales se usan cada vez con mayor frecuencia. Algunos de ellos tienen capacidad para seguir una determinada ruta o dirección por medio de dispositivos magnéticos lo que hace que puedan “virar” en una junta o “Y” de tuberías e ir hacia un ramal específico. Otros son capaces de emplear ecualización de la presión diferencial para así fluidizar los sólidos que están empujando.

Es posible que se tenga que correr más de una vez un tipo específico de cochino. La remoción de arena en las tuberías, por lo general, necesita que se efectúen varias corridas hasta que se llegue al punto en el cual se alcanza un nivel “aceptable” de sólidos. En el proceso real de remoción de sólidos se debe prestar

atención a la composición de los minerales presentes, ya que la disposición en este punto del proceso constituye una parte integral de la limpieza.

En los campos en donde existe un proceso de manejo de arena, la remoción de sólidos de la tubería debe ser una parte integral de la estrategia de tal manejo, en consecuencia operaciones como la limpieza de tuberías llegarían a ser mantenimientos rutinarios de bajo nivel en contraposición con los procesos de remoción de mayor envergadura en los cuales se extraen grandes volúmenes de arena de la tubería [3].

### **2.9.3 Separación de sólidos en recipientes horizontales**

Las tuberías y los equipos de planta transportan los fluidos de producción para efectuar la separación mayormente en grandes recipientes horizontales. La presencia de sólidos en estos recipientes puede afectar el proceso de separación a medida que los sólidos se asientan en el fondo y hacen crecer una capa o “colchón”.

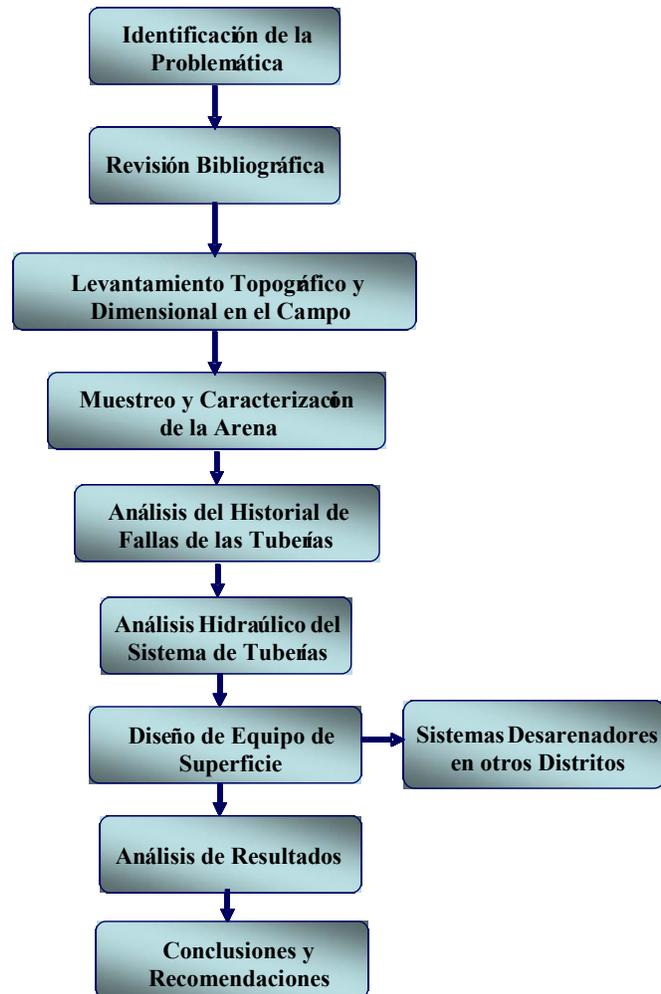
En el caso de los grandes recipientes el proceso de separación se basa en la acción de la gravedad para separar tanto el agua como el petróleo de una manera efectiva. La suma de otra fase (sólida) quiere decir que la misma dispone del tiempo suficiente como para llegar a asentarse en el fondo del recipiente. Un colchón o capa de sólidos provocará un cambio en las áreas del flujo dentro del recipiente de una manera directa al disminuir el tiempo de residencia y aumentar el flujo de petróleo y agua en el recipiente. Estas condiciones van en detrimento de la separación eficiente del petróleo y del agua y tienden a dificultar el proceso de manera significativa [3].

## **CAPÍTULO 3**

### **METODOLOGÍA DE TRABAJO**

Para lograr los objetivos planteados en el inicio de cualquier trabajo, es necesario aplicar una metodología bien ordenada, basándose en la información disponible, y las estrategias aplicadas se puede obtener la solución del problema. La metodología aplicada en este trabajo se puede resumir en el diagrama de flujo mostrado en la Fig. 3.1.

El objetivo de este estudio es proponer soluciones a corto, mediano y largo plazo, que permitan minimizar el desgaste por erosión de las líneas que alimentan a DEFO-2 y la línea de transferencia de DEFO-2 hasta DEPO, además de estudiar la posibilidad de colocar un sistema de desarenado que permita minimizar el problema erosivo por causa de la arena proveniente de los pozos en la línea de transferencia que transporta los fluidos de la estación de flujo DEFO-2 hasta la estación principal DEPO de la Unidad de Producción Dación, PDVSA Distrito San Tomé.



**Figura 3.1. Diagrama de Flujo de la Metodología de Trabajo.**

### 3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Esta etapa consistió en recopilar toda la información disponible referente al problema de erosión en las líneas de flujo y transferencia, causado por el arenamiento de la Unidad de Producción Dación. Entre las informaciones disponibles se tienen: antecedentes, visitas al sitio, datos de procesos, sistema de desarrollo de superficie,

equipos, métodos de separación, operabilidad, así como tecnologías aplicadas en otros Distritos donde utilizan equipos de superficie para el desarenado de crudo y otras existentes en el mercado.

También, se consultó informes previos, personal técnico, sumarios de los pozos, folletos, data disponible, mapas existentes, entre otros; y todo aquel material que fuese necesario para conocer el área de estudio, de manera de enfatizar sobre los aspectos resaltantes de la misma.

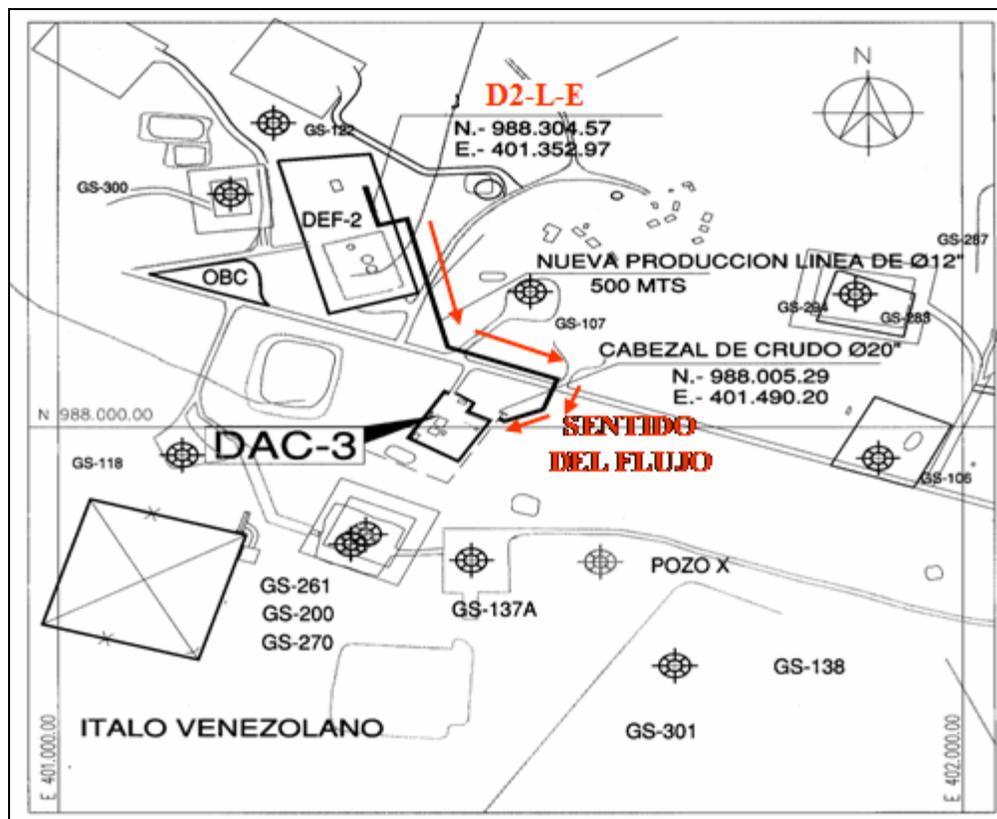
De los 48 pozos que se encuentran conectados a los múltiples de interés (D2-R-SE, D2-L-E, WFS-R-W1-2), se generó el inventario de los datos de producción (Summary Report) que contiene información de los pozos productores e inyectores, abiertos y cerrados, barriles netos de crudo por día, barriles de agua diaria, porcentaje de agua y sedimentos, gravedad API, el tipo de método de recuperación secundaria utilizado, tipo de reductor durante la prueba, las arenas productoras, etc. **(APÉNDICE A)**.

Se recopiló información de los pozos que contienen algún equipo de control de arena con respecto a los que no tienen **(APÉNDICE B)**. De los 48 pozos se corroboró por sus respectivos diagramas mecánicos o well Sketch **(APÉNDICE C)** que veinticuatro (24) pozos están desprotegidos, dieciocho (18) pozos están empacados con grava y cinco (5) pozos contienen rejilla (son desviados).

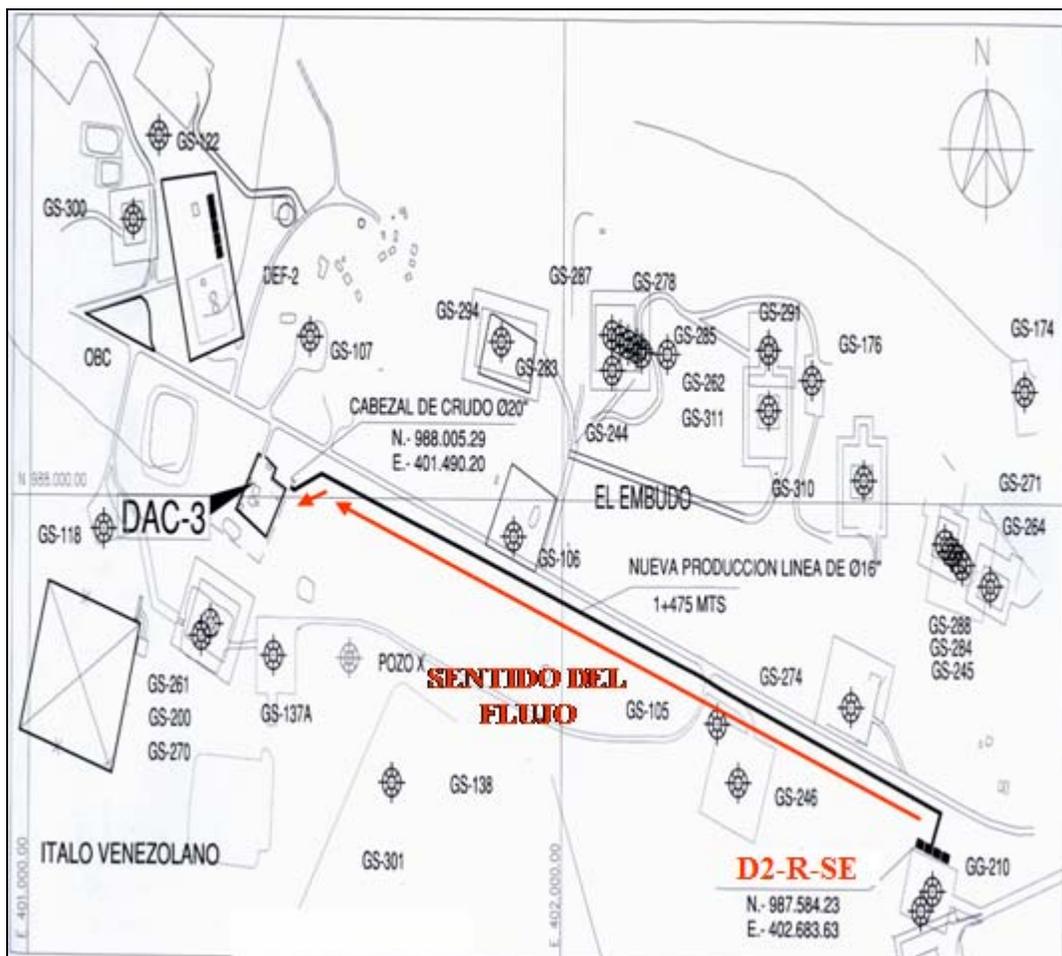
### **3.2 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO Y DIMENSIONAL DEL CAMPO**

Se tomaron las medidas de los diámetros, longitudes y accesorios de las líneas que salen de los diferentes múltiples hasta la línea de recolección ubicada en DAC-3, y de la línea de transferencia que sale de DEFO-2 hasta la estación principal DEPO, para generar un plano de ubicación de cada múltiple en estudio, logrando un buen

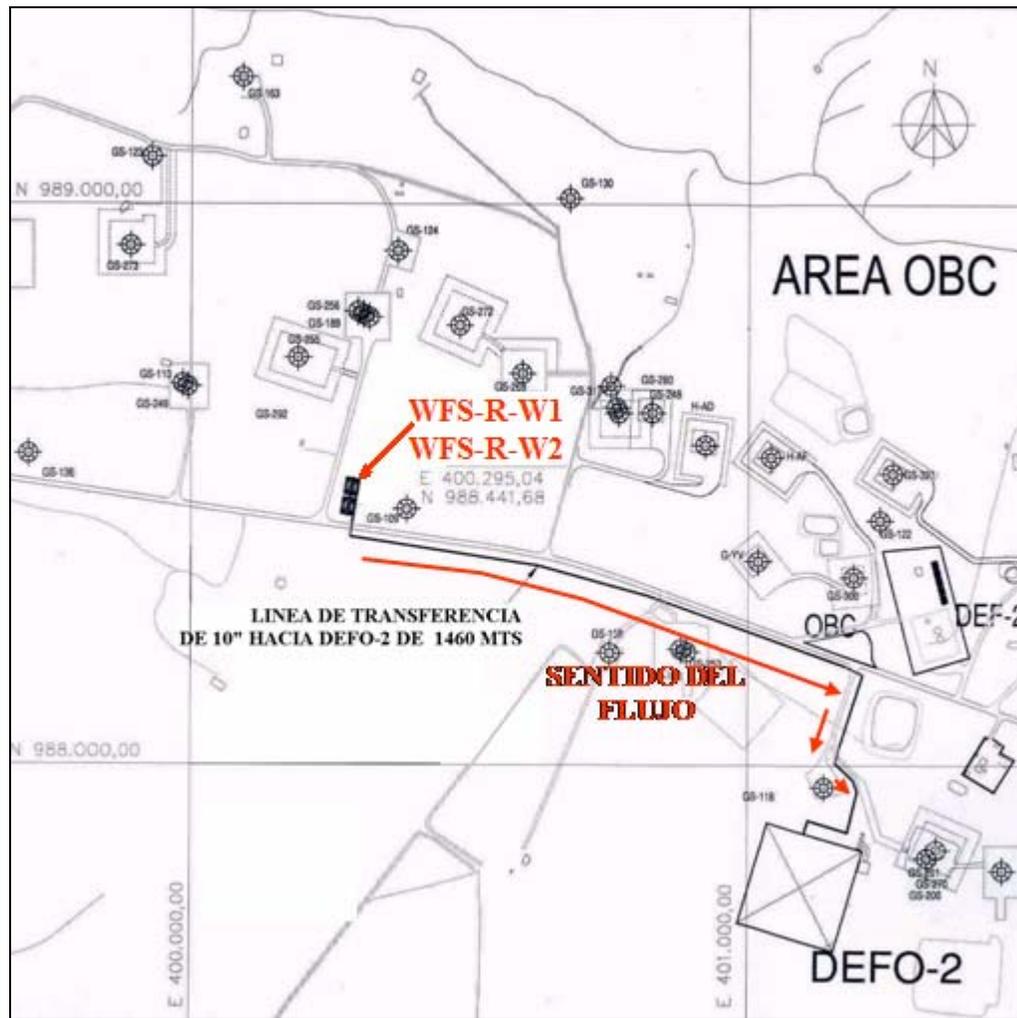
esquema de visualización e interpretación del área (Ver Figs. 3.2, 3.3 y 3.4). Estos datos serán usados como los parámetros de entrada para la simulación en PIPEPHASE 8.1, así poder obtener las velocidades erosivas y caída de presión en las diferentes líneas. En el **APÉNDICE D**, se muestran los planos del sistema de recolección de flujo, luego de realizar el levantamiento topográfico y dimensional del sistema.



**Figura 3.2. Plano del múltiple D2-L-E que va a DAC-3, localizado en el área de la U.P Dación.**



**Figura 3.3. Plano del múltiple D2 – R – SE que va a DAC-3, localizado en el área de la U.P Dación.**



**Figura 3.4. Plano del múltiple WFS-R-W1 y WFS-R-W2 que va a DEFO-2, localizado en el área de la U.P Dación.**

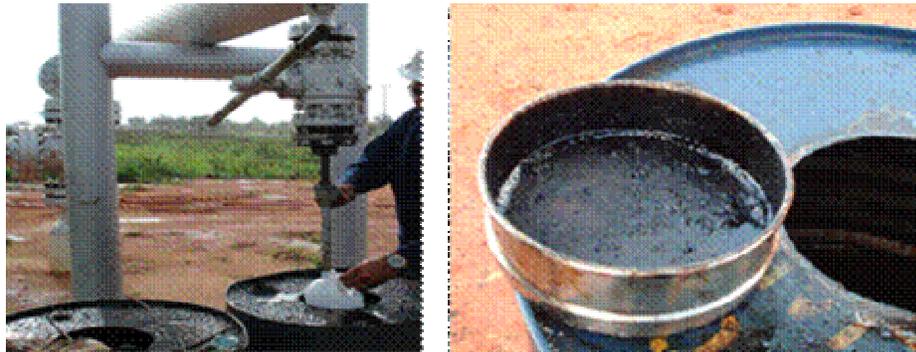
### **3.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LOS FLUIDOS Y ARENAS PRESENTES EN LAS CORRIENTES DE LOS FLUIDOS**

Para la realización de las tomas y análisis de las muestras se trabajó en conjunto con el Laboratorio de PDVSA San Tome y la empresa Champion Technologies, que son las encargadas de realizar la recolección de muestras de fluido y arena en los

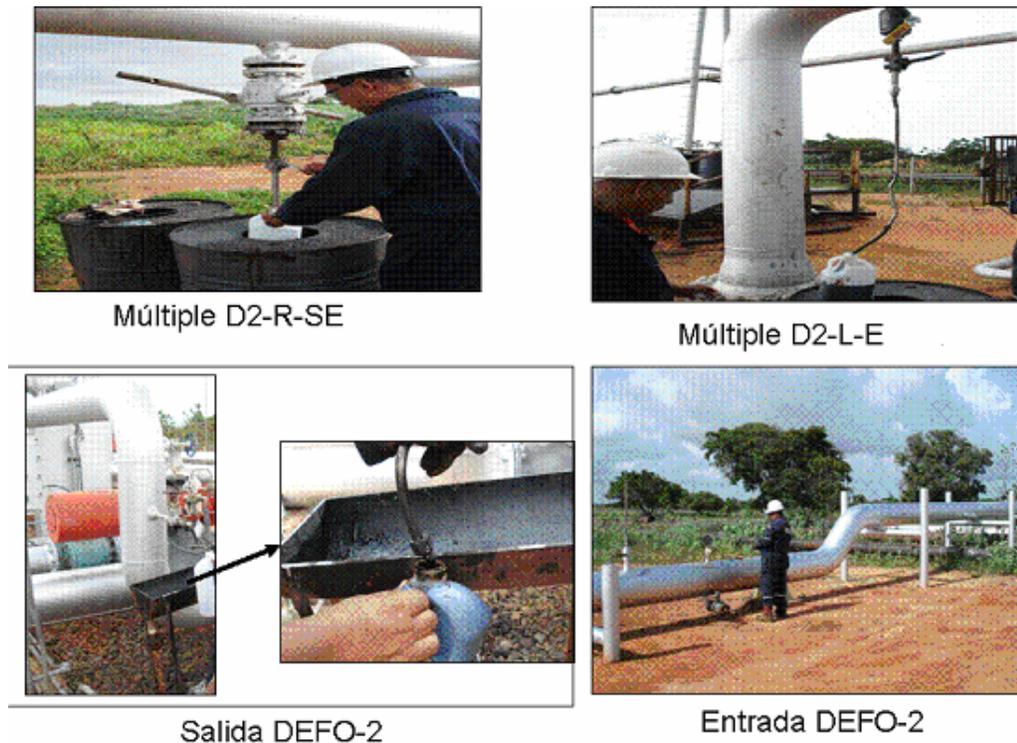
diferentes múltiples del área de la U.P. Dación. Se utilizaron los recipientes y tamices necesarios (Ver Fig. 3.5) para facilitar la recolección de las muestras. Se coordinaron los puntos más representativos de recolección de las muestras de fluido. Estos puntos de recolección se localizaron en los siguientes lugares (Ver Fig. 3.6):

1. Salida del múltiple D2-R-SE.
2. Salida del múltiple D2-L-E.
3. Entrada de DEFO-2.
4. Salida de DEFO-2.

Las muestras fueron llevadas al laboratorio para realizar los diferentes análisis para obtener tanto las propiedades físicas y químicas de los fluidos como la granulometría de la arena presente en las líneas de flujo. Esta información fue necesaria para el análisis hidráulico del sistema de recolección hasta la estación de flujo DEFO-2, y de la línea de transferencia hasta DEPO.



**Figura 3.5. Tipo de tamiz TYLER ASTME 11-61, utilizado para las tomas de muestras de arenas.**



**Figura 3.6. Puntos de recolección de muestras de fluidos.**

Se utilizaron los datos de presión y temperatura medidos en el levantamiento topográfico del campo, para la caracterización física y química de los fluidos y arenas presentes en las corrientes de los fluidos. La Compañía Champion Technologies en conjunto con el laboratorio de PDVSA San Tomé, efectuaron los diferentes análisis para determinar: las viscosidades a temperaturas de 90°F, 110°F y 130°F, (Ver Fig. 3.7), los grados API, la gravedad específica, el análisis del crudo, el tamaño de grano (granulometría) y el análisis de sólido por marcha analítica. Estas informaciones completaron los datos necesarios para simular el sistema de recolección de DEFO-2 (APÉNDICE E).

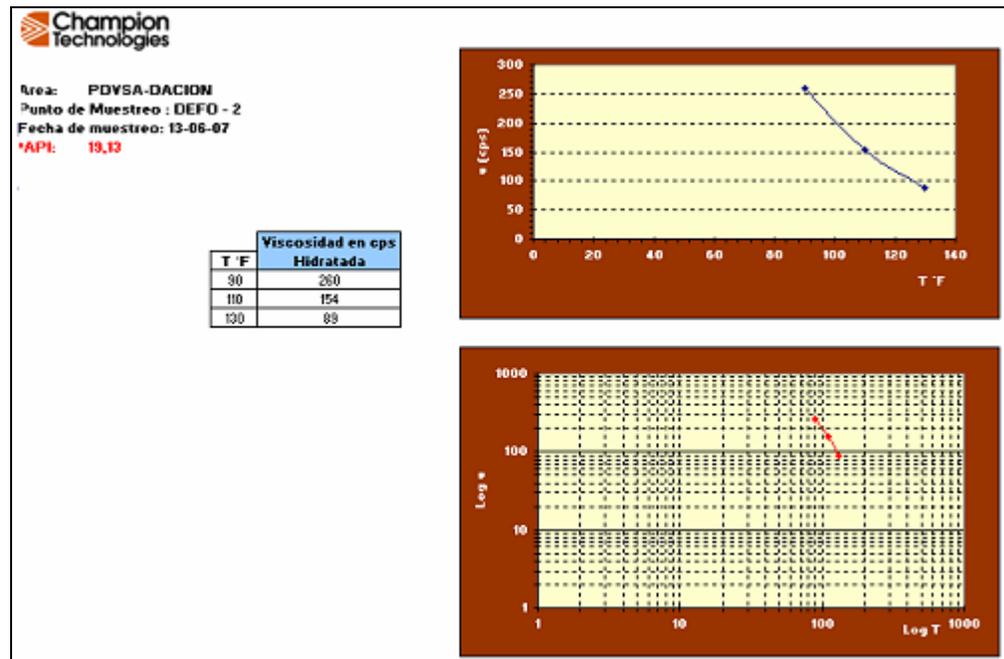
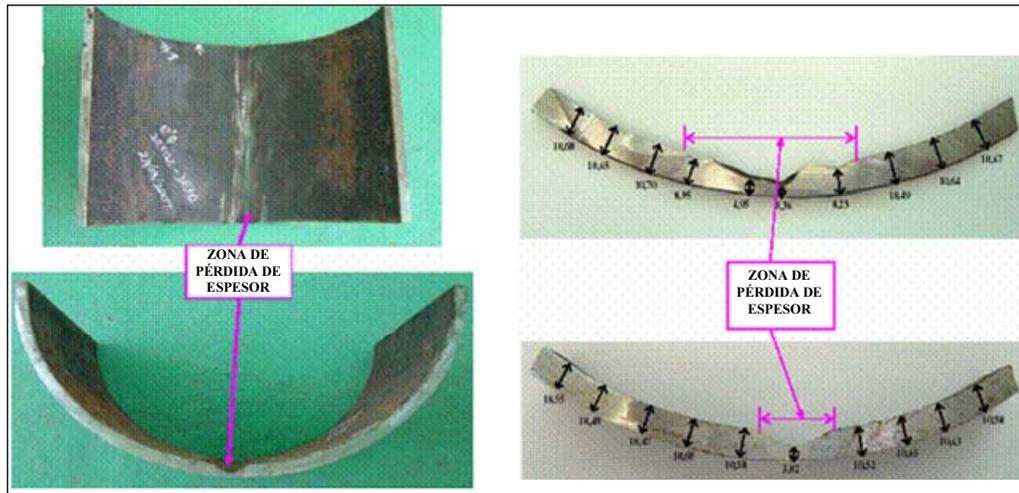


Figura 3.7. Gráfico de Viscosidad en función de la temperatura.

### 3.4 ANÁLISIS DEL HISTORIAL DE FALLAS

La empresa PRODUTEC, realizó una investigación metalúrgica destructiva en la línea de transferencia de crudo de 0,3048 m (12") de diámetro que sale de DEFO-2 y llega a DEPO, con el fin de determinar las causas de la fuga y prevenir su recurrencia aplicando medidas correctivas.

De acuerdo a la inspección visual, la superficie interna de la línea de transferencia presentó una zona de pérdida de espesor orientada en forma de ranura longitudinal asociada con una fuga que ocurrió en la zona inferior de la línea en Mayo 2006 [9]. La ranura corresponde a la parte inferior de la línea de transferencia de 12" instalada superficialmente y que tiene un recorrido básicamente horizontal (Ver Fig. 3.8).



**Figura 3.8. Vista general de la sección removida para Análisis [9].**

Mediante un análisis granulométrico por Rayo Láser y Difracción de Rayos X realizado al material removido de la línea de transferencia (Ver Figs. 3.9 y 3.10), se determinó el tamaño de las partículas presentes (Ver Tabla 3.1):



**Figura 3.9. Muestra en estado de entrega [9].**



**Figura 3.10. Muestra separada [9].**

**Tabla 3.1. Tamaño de partículas [9]**

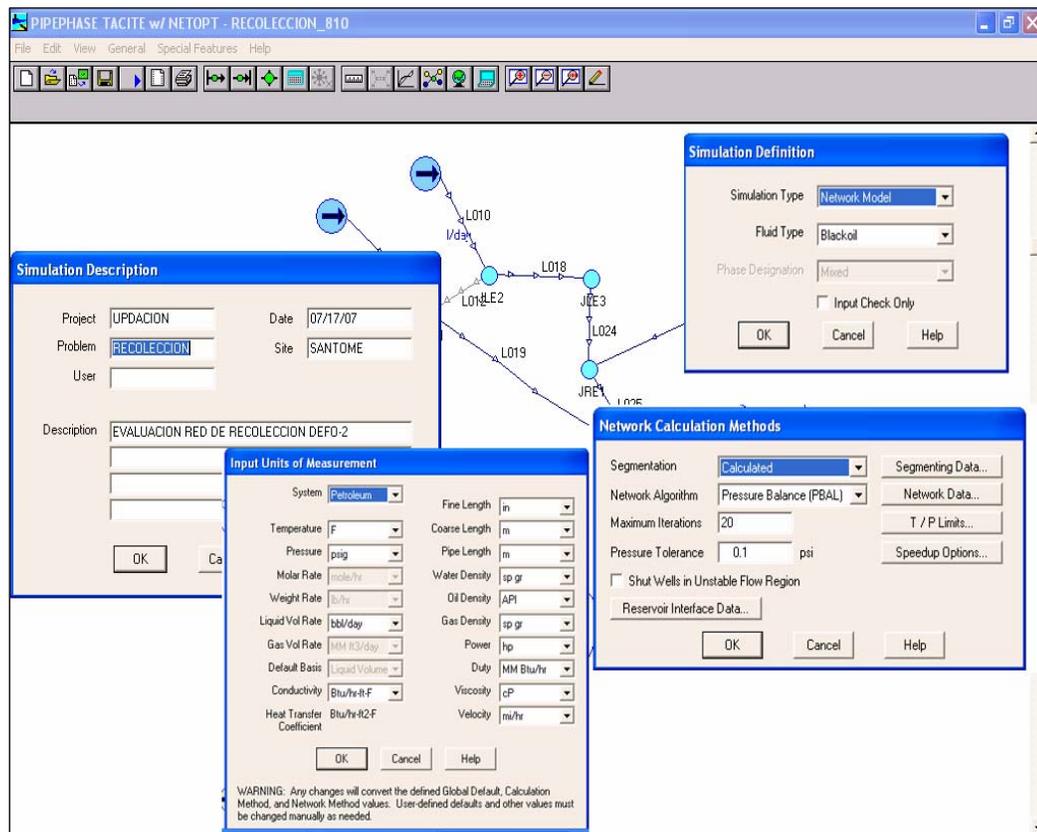
| <b>Muestra</b>                                 | <b>D &lt; 10%</b>   | <b>D = 50%</b>       | <b>D &gt; 90%</b>    |
|--|---------------------|----------------------|----------------------|
| <b>tomada en la línea de DEFO-2 hasta DEPO</b> | 66,56 $\mu\text{m}$ | 260,19 $\mu\text{m}$ | 643,84 $\mu\text{m}$ |

Donde el tamaño promedio de partícula presente en la tubería se ubicó en 260  $\mu\text{m}$ , valor que está acorde con el examen de partículas en Microscopía Electrónica. El análisis de Difracción de Rayos X mostró la presencia mayoritaria de Sílice como el mineral que estuvo presente en el fluido de la tubería.

### **3.5 ANÁLISIS HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE TUBERÍAS**

#### **3.5.1 Datos de entrada al Simulador PIPEPHASE 8.1**

Para realizar el análisis hidráulico del sistema de tuberías que conforma el área de estudio, se introdujeron los datos necesarios en el simulador PIPEPHASE 8.1 para realizar las simulaciones respectivas y poder obtener los resultados referentes a las caídas de presiones y las velocidades en las líneas de flujo y transferencia en el área de la U.P. Dación. Entre la data suministrada al simulador PIPEPHASE 8.1 se tiene: la descripción y caracterización del fluido, presión, temperatura, unidades de medida de entrada y salida, método de cálculo a usar entre otros (Ver Fig. 3.11).



**Figura 3.11. Datos de entrada generales del PIPEPHASE 8.1.**

### 3.5.2 Sistema de Recolección de Tuberías

Se creó el sistema de recolección de las líneas de flujo utilizando los módulos del simulador (ver **APÉNDICE F**: primera corrida realizada en el simulador). Este sistema contiene las propiedades de cada múltiple como son la presión, temperatura, gravedad API, corte de agua, relación gas-petróleo, diámetro, longitud, Schedule, lo que permitió conocer las condiciones actuales de operación del sistema (Ver Fig. 3.12).

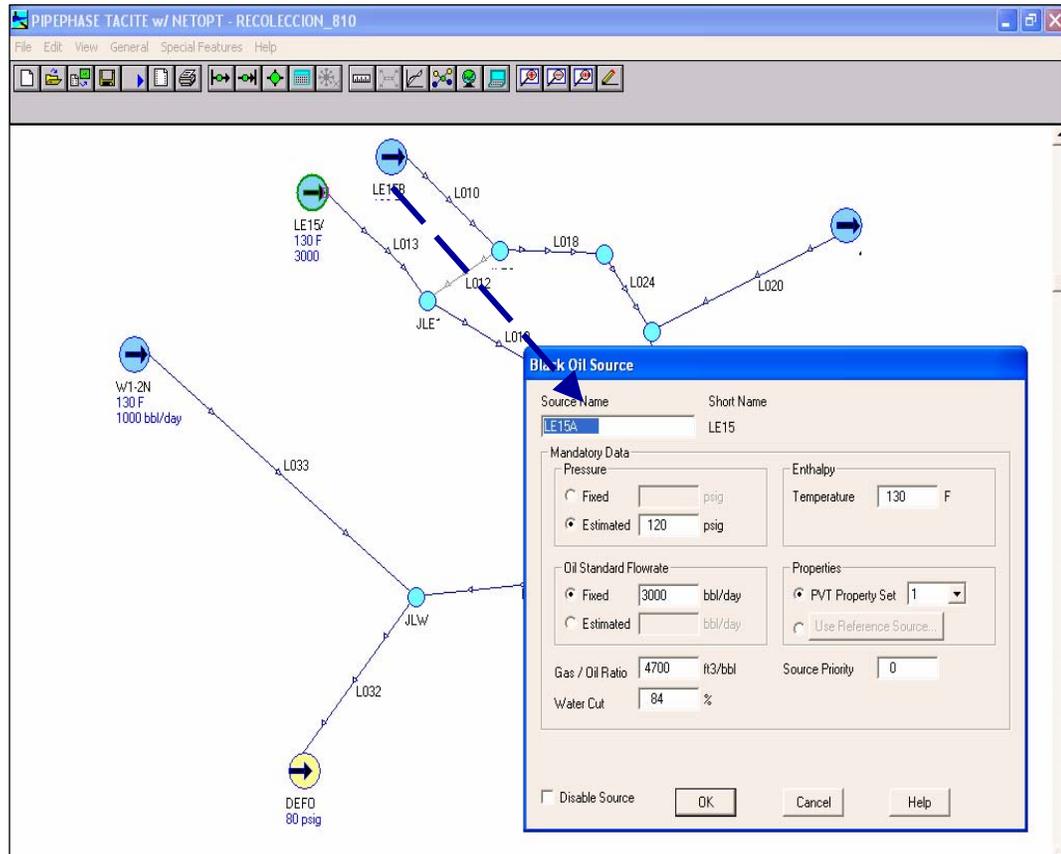


Figura 3.12. Líneas de recolección hasta DEFO-2 y sus propiedades.

### 3.5.3 Cálculo de las velocidades erosivas y máxima caída de presión del sistema de recolección de fluidos

Se calcularon las velocidades erosivas en las líneas de flujo utilizando la Ec. (2.1) perteneciente al criterio API-RP14E (Práctica Recomendada para el Diseño e Instalación de Sistemas de Tuberías para Plataforma de Producción). Esta Norma recomienda que la velocidad de flujo en tuberías no debe exceder el valor de la velocidad erosiva en el sistema, a fin de evitar problemas de erosión:

$$V_e = \frac{C}{\sqrt{\rho}} \quad (2.1)$$

donde:

$V_e$  = Velocidad erosiva (m/s).

$C$  = Constante adimensional.

$\rho$  = Densidad del Fluido (kg/m<sup>3</sup>)

Se asignó el valor de cien (100) para la Constante adimensional “C”, por estar en un sistema de servicio continuo de fluido. Para poder disminuir estas velocidades se realizó un estudio del sistema, cambiando el diámetro de las líneas de flujo, colocando arreglos de tuberías buscando adaptar el mismo con el fin de minimizar dichas velocidades. (Ver resultados en el próximo capítulo, referente a la segunda corrida en el Simulador PIPEPHASE 8.1).

La clasificación de tuberías de PDVSA se basa en los códigos y normas ANSI, ASME y ASTM correspondientes para los diferentes materiales y componentes de los sistemas de tuberías, especialmente en los códigos ASME/ANSI B.31.1 (Tubería de vapor) y ASME/ANSI B31.3 (Tubería para plantas químicas y refinerías de petróleo). La información básica requerida para determinar la clase de tubería seleccionada (ver **APÉNDICE G: cálculo hidráulico de tuberías PDVSA N° L-TP 1.5**) es la siguiente:

1. Material (fluido) contenido en la línea, con sus condiciones de operación.
2. Presión de diseño por el código de tubería.
3. Temperatura de diseño coincidente con la presión de diseño.

Con la anterior información, se busca en la especificación H-221 (Materiales de tuberías) el índice de servicio, en el cual, dado el fluido manejado y las condiciones de diseño, se determina la clase a ser utilizada. Con esta clase, se busca la tabulación correspondiente, la cual muestra el tipo de servicio, los límites de presión/temperatura, el espesor, material y tipo de fabricación de los tubos, niples, entre otros., y una serie de notas relacionadas con el diseño de sistemas y componentes para la clase seleccionada (ver **APÉNDICE G**) correspondiente al cálculo hidráulico de tuberías PDVSA N° L-TP 1.5.

### **3.6 DISEÑO DEL EQUIPO DE SUPERFICIE**

Debido a la alta producción de arena que hay actualmente en la Unidad de Producción Dación (U.P Dación) y partiendo de la experiencia de otros Distritos como Morichal Norte y de estudios realizados en empresas como: INTEVEP, NATCO, Integrated Flow Solutions (IFS), CORINPET, COTRAP, etc., se estudió la posibilidad de colocar en la salida de los múltiples un equipo de control de arena conocido como *ciclón*.

Considerando lo antes expuesto se procedió a diseñar un ciclón (Ver Fig. 3.13) con los datos de entrada requeridos por la Teoría de Leith y Licht, la cual predice las eficiencias de colección de material particulado. Esta teoría se basa en las propiedades físicas del material particulado y el gas de arrastre, así como las relaciones entre proporciones del ciclón. Las otras leyes consideradas para el diseño fueron: la Ley gravitacional (Ley de Stokes) que maneja tamaño, peso, densidad, y viscosidad del fluido (Ec. (2.3)) y la Ley Centrífuga, la cual establece que la fuerza centrífuga empuja los elementos más densos a la pared exterior de un elemento cónico o cilíndrico.

$$V = \frac{d^2(\rho_p - \rho_l)g}{18\mu}$$

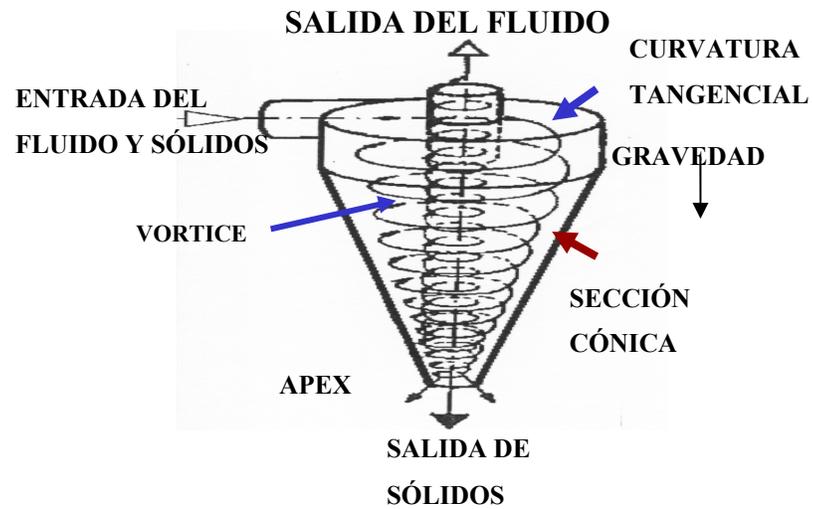


Figura 3.13. Modelo de equipo desarenador ciclón [12].

## **CAPÍTULO 4**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Para el desarrollo de este estudio se realizaron una serie de estimaciones y evaluaciones, las cuales permitieron alcanzar cada uno de los objetivos propuestos. Es de hacer notar que dichas evaluaciones se basaron en: las Normas de Diseño de PDVSA, las normas de American Petroleum Institute (API), los requerimientos operacionales planteados por la Gerencia de Exploración (EyP), y la tecnología y experiencia adquirida en otros proyectos del Distrito Morichal.

#### **4.1 SOLUCIÓN A CORTO PLAZO A LA PROBLEMÁTICA DE LA EROSIÓN**

Se evaluaron equipos de superficie, tramos de tuberías provenientes de los diferentes múltiples adyacentes a la Unidad de Producción Dación hasta la estación de flujo DEFO-2. Se realizó un análisis de sensibilidad a las líneas con problemas de erosión utilizando el simulador PIPEPHASE 8.1 y por último se estudiaron las diferentes propuestas de ubicación y selección del equipo desarenador a instalarse en la estación de flujo DEFO-2.

##### **4.1.1 Determinación de las velocidades de flujo y erosivas de las diferentes tuberías en el sistema de recolección de fluidos de DEFO-2**

Se tomaron de campo los valores de presión, temperatura, tasa de producción, corte de agua, longitud y diámetros de los diferentes tramos de tuberías, de los

múltiples adyacentes a la Unidad de Producción Dación que envían sus fluidos a la estación de flujo DEFO-2.

La Tabla 4.1 muestra las características del flujo, así como las dimensiones de las líneas que salen de los múltiples que intervienen en el sistema de recolección de fluidos de la estación principal DEPO.

**Tabla 4.1. Datos de entrada de las líneas de salida de los Múltiples**

| CARACTERÍSTICAS                                 | LÍNEAS DE SALIDA DE LOS MÚLTIPLES |           |         |         |
|---|-----------------------------------|-----------|---------|---------|
|   | D2-RSE                            | WFS-RW1-2 | D2-LE-A | D2-LE-B |
| <b>Presión (psig)</b>                           | 110                               | 130       | 120     | 120     |
| <b>Temperatura (°F)</b>                         | 142,5                             | 136,8     | 136,1   | 147,6   |
| <b>Densidad de la mezcla (kg/m<sup>3</sup>)</b> | 86,019                            | 58,948    | 64,875  | 59,589  |
| <b>RGP (PCN/BN)</b>                             | 7145                              | 8341      | 5416    | 5416    |
| <b>Corte de Agua (%)</b>                        | 89                                | 84        | 84      | 84      |
| <b>Longitud (m)</b>                             | 1475                              | 1460      | 550     | 550     |
| <b>Diámetro (m)</b>                             | 0,406                             | 0,254     | 0,305   | 0,305   |
| <b>Schedule</b>                                 | 40                                | 40        | 40      | 40      |
| <b>N° de Pozos Asociados</b>                    | 15                                | 14        | 13      | 10      |
| <b>Tasa de producción (Bls/D)</b>               | 2300                              | 1000      | 3000    | 2000    |

En la Tabla 4.2 se muestra las condiciones de flujo y dimensiones de las líneas de recolección.

**Tabla 4.2. Datos de las líneas de recolección**

| CARACTERÍSTICAS                      | LÍNEAS DE RECOLECCIÓN |                            |
|--------------------------------------|-----------------------|----------------------------|
|                                      | Tramo 1               | Tramo 2 (llegada a DEFO-2) |
| <b>Presión (psig)</b>                | 102,6                 | 90,6                       |
| <b>Temperatura (°F)</b>              | 140,7                 | 136,5                      |
| <b>Densidad de la mezcla (kg/m3)</b> | 61,03                 | 54,463                     |
| <b>Longitud (m)</b>                  | 394                   | 250                        |
| <b>Diámetro (m)</b>                  | 0,508                 | 0,508                      |
| <b>Schedule</b>                      | 40                    | 40                         |

En la Tabla 4.3 se encuentra la información de las condiciones de entrada de la estación de flujo DEFO-2 y de la estación principal DEPO.

**Tabla 4.3. Datos de entrada de DEFO-2 y DEPO**

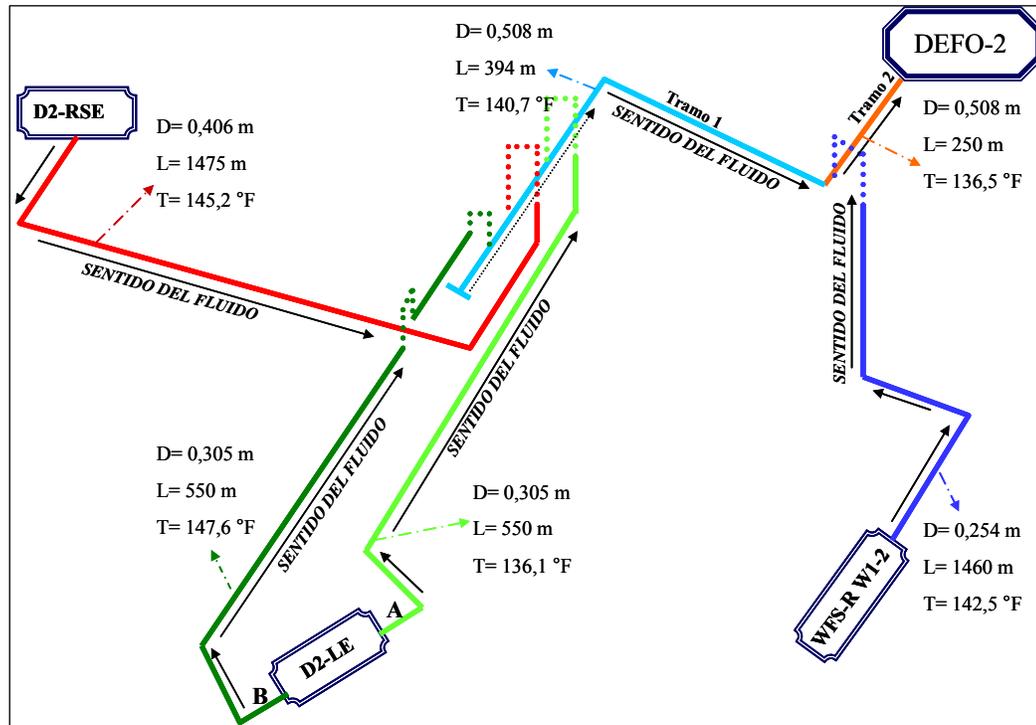
| CONDICIONES DE ENTRADA           | ESTACIÓN |       |
|----------------------------------|----------|-------|
|                                  | DEFO-2   | DEPO  |
| <b>Presión (psig)</b>            | 80       | 95    |
| <b>Temperatura (°F)</b>          | 137,6    | 127,7 |
| <b>Tasa de producción (MBPD)</b> | 52       | 58,5  |

La Tabla 4.4 muestra la información de las condiciones de salida y dimensiones de la estación de flujo DEFO-2.

**Tabla 4.4. Datos a la salida de DEFO-2**

| <b>CARACTERÍSTICAS</b>                                  | <b>ESTACIÓN</b> |
|---|-----------------|
|   | <b>DEFO-2</b>   |
| <b>Presión (psig)</b>                                   | 146             |
| <b>Temperatura (°F)</b>                                 | 137,6           |
| <b>Tasa de producción (Bls/D)</b>                       | 8300            |
| <b>RGP 1 % del gas separado en la estación (PCN/BN)</b> | 50              |
| <b>Corte de Agua (%)</b>                                | 86              |
| <b>Longitud (m)</b>                                     | 3200            |
| <b>Diámetro (m)</b>                                     | 0,305           |
| <b>Schedule</b>   | 40              |
| <b>N° de Pozos Asociados</b>                            | 52              |

En la Fig. 4.1 se puede observar un diseño esquemático donde se muestra los múltiples, dimensiones de las líneas de recolección, sentido y temperaturas del flujo.



**Figura 4.1. Diagrama esquemático de los Múltiples y Líneas de recolección de los fluidos de DEFO-2.**

Para el cálculo teórico de las velocidades de erosión en los diferentes tramos de tuberías se usó la Norma API-RP 14 E de la guía de servicios erosivos. En la Tabla 4.5 se puede observar los diferentes valores de la velocidad erosiva, así como las presiones y máximas caídas de presión para las líneas que salen de los diferentes múltiplos.

**Tabla 4.5. Valores de la velocidad erosiva y caídas de presión de acuerdo a los Códigos y Normas API RP 14E y ASME/ANSI B31.3**

| <b>Línea</b>                       | <b>Densidad de la Mezcla (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Presión (psig)</b> | <b>Velocidad Erosiva (m/s)</b> | <b>Caída Máxima de Presión. (psi/100 pies)</b> |
|------------------------------------|---|-----------------------|--------------------------------|--|
| <b>WFS-R</b>                       | <b>58,948</b>                                   | <b>112,60</b>         | <b>13,024</b>                  | <b>0,4</b>                                     |
| <b>W1-2</b>                        | <b>49,497</b>                                   | <b>90,60</b>          | <b>14,213</b>                  | <b>0,4</b>                                     |
| <b>D2-LE-B</b>                     | <b>59,589</b>                                   | <b>114,20</b>         | <b>12,954</b>                  | <b>0,4</b>                                     |
|                                    | <b>59,108</b>                                   | <b>102,60</b>         | <b>13,006</b>                  | <b>0,4</b>                                     |
| <b>D2-LE-A</b>                     | <b>64,875</b>                                   | <b>125,80</b>         | <b>12,415</b>                  | <b>0,4</b>                                     |
|                                    | <b>63,914</b>                                   | <b>123,90</b>         | <b>12,508</b>                  | <b>0,4</b>                                     |
| <b>D2-RSE</b>                      | <b>86,019</b>                                   | <b>121,40</b>         | <b>10,782</b>                  | <b>0,4</b>                                     |
|                                    | <b>75,127</b>                                   | <b>102,60</b>         | <b>11,537</b>                  | <b>0,4</b>                                     |
| <b>Tramo 1</b>                     | <b>61,03</b>                                    | <b>102,60</b>         | <b>12,800</b>                  | <b>0,4</b>                                     |
|                                    | <b>54,943</b>                                   | <b>90,60</b>          | <b>13,490</b>                  | <b>0,4</b>                                     |
| <b>Tramo 2</b><br>(llegada DEFO-2) | <b>54,463</b>                                   | <b>90,60</b>          | <b>13,550</b>                  | <b>0,4</b>                                     |
|                                    | <b>49,177</b>                                   | <b>80,00</b>          | <b>14,259</b>                  | <b>0,4</b>                                     |

Estos valores representan la máxima velocidad que puede alcanzar la corriente de fluido sin ocasionar desgaste en los diferentes tramos de tuberías. Actualmente, las líneas que provienen de los múltiples D2-RSE, D2-LE-A, D2-LE-B, Tramo 1 y Tramo 2 (llegada a DEFO-2), presentan velocidades de flujo que causan desgaste interno en las tuberías. Por lo tanto, se realizó un estudio de sensibilidad utilizando el simulador PIPEPHASE 8.1, que consistió en la variación del diámetro de las tuberías en las líneas con problemas de erosión. Se utilizaron los datos obtenidos anteriormente (Ver Tabla 4.5) y se determinaron los valores de la conductividad y

viscosidad del aire, entre otros, que fueron necesarios para obtener mejores resultados en el simulador, estos valores se encuentran tabulados en la Tabla 4.6.

**Tabla 4.6. Características del flujo de las líneas de salidas de los múltiples**

| Características                     | LÍNEAS DE SALIDA DE LOS MÚLTIPLES |         |         |            |         |         |
|-------------------------------------|-----------------------------------|---------|---------|------------|---------|---------|
|                                     | D2-RSE                            | D2-LE-B | D2-LE-A | WFS-R W1-2 | Tramo 1 | Tramo 2 |
| Conductividad del Aire (Btu/hpie°F) | 0,015                             | 0,015   | 0,015   | 0,015      | 0,015   | 0,015   |
| Viscosidad del Aire (cp)            | 0,018                             | 0,018   | 0,018   | 0,018      | 0,018   | 0,018   |
| Densidad del Aire (sp gr)           | 1                                 | 1       | 1       | 1          | 1       | 1       |
| Velocidad del Aire (mi/h)           | 0,727                             | 0,727   | 0,727   | 0,727      | 0,727   | 0,727   |
| COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA       |                                   |         |         |            |         |         |
| Inside (Btu/hpie°F) (adentro)       | 200                               | 200     | 200     | 200        | 200     | 200     |
| Outside (Btu/hpie°F) (afuera)       | 3                                 | 3       | 3       | 3          | 3       | 3       |
| Radiación (Btu/hpie°F)              | 0,107                             | 0,1085  | 0,1053  | 0,10715    | 0,1060  | 0,1057  |

Una vez que se recopiló la información, se introdujo en el simulador y se obtuvo como resultado una serie de tablas con caídas de presiones ( $\Delta P$ ) y velocidades del flujo en los tramos que conforman las líneas de salida de los múltiples que permitieron comparar cada uno de los tramos de tuberías en función de la variación de los diámetros, que corresponde a la variable más importante que influye en el comportamiento del flujo y el diferencial de presión dentro del sistema de tuberías.

En la Fig. 4.2 se muestra un esquema del sistema actual de recolección de los fluidos de la estación de flujo DEFO-2 generado en el simulador PIPEPHASE 8.1, este sistema está conformado por las líneas L001 de 0,4064 m (16”), L002, L003 y L004 de 0,3048 m (12”), L005 y L007 de 0,508 m (20”) y L006 de 0,254 m (10”).

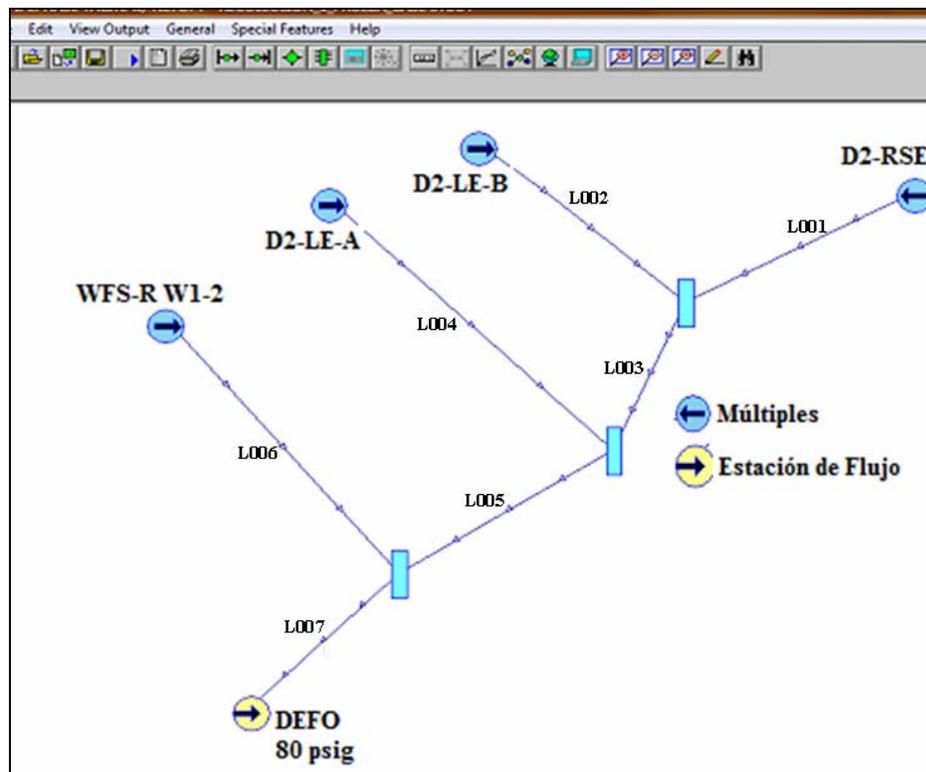


Figura 4.2. Diseño del Sistema actual de Recolección de flujo.

#### 4.1.2 Primer Estudio Hidráulico

##### A. Análisis de las líneas que salen de los diferentes múltiples del sistema de recolección de flujo

Se realizó la primera simulación del Sistema de Tuberías Original descrito en la Fig. 4.2, donde se obtuvieron los valores de las velocidades de erosión, las cuales al

ser comparadas con las obtenidas por la norma API-RP 14E no sobrepasan las calculadas por esta norma (ver Tabla 4.5). Sin embargo las máximas caídas de presión calculadas en las líneas L002, L003, L004, L005 y L007 sobrepasan los obtenidos por los códigos y normas ASME/ANSI B31.3 utilizados por PDVSA (ver Tabla 4.7 y APÉNDICE F y G).

**Tabla 4.7. Variación de las velocidades erosivas y caídas de presión en el sistema de recolección de flujo**

| Líneas de salida múltiples | Díámetro (pulg) | Velocidad máxima de acuerdo a la Norma API-RP 14E (m/s) | Velocidad obtenida por el simulador PIPEPHASE (m/s) | Máxima caída de presión de acuerdo a la Norma (psi/100 pies) | Máxima caída de presión obtenida por el simulador PIPEPHASE (psi/100 pies) |
|----------------------------|-----------------|---|---|--|--|
| L001                       | 16"             | 10,782 –<br>11,537                                      | 8,23 –<br>8,47                                      | 0,4  | 0,33 -<br>0,37   |
| L002                       | 12"             | 12,954 –<br>13,006                                      | 9,11 –<br>9,47                                      | 0,4  | 0,59 -<br>0,63   |
| L003                       | 12"             | 12,71 –<br>12,82  | 9,01 –<br>9,033                                     | 0,4  | 3  |
| L004                       | 12"             | 12,415 –<br>12,508                                      | 9,15 –<br>9,34                                      | 0,4  | 1  |
| L005                       | 20"             | 12,800 –<br>13,490                                      | 9,16 –<br>9,38                                      | 0,4  | 0,83   |
| L006                       | 10"             | 13,024 –<br>14,213                                      | 9,05 –<br>9,17                                      | 0,4  | 0,39 –<br>0,46   |
| L007                       | 20"             | 13,550 –<br>14,259                                      | 9,48 –<br>9,69                                      | 0,4  | 1  |

Los resultados de la máxima caída de presión al no cumplir con los códigos y normas ASME/ANSI B31.3 establecidos por PDVSA, llevó a la realización de un análisis de sensibilidad del sistema de recolección de flujo utilizando el simulador

PIPEPHASE 8.1. Este análisis consistió en variar los diámetros de las líneas para ver la influencia de este parámetro en las velocidades erosivas y en las caídas de presión en las líneas, y así comparar sus variaciones con el sistema original.

### B. Análisis de sensibilidad de las líneas que salen de los diferentes múltiples del sistema de recolección de flujo

Para este análisis de sensibilidad se realizaron dos casos de estudio:

a) **Caso1.** Aumento de los diámetros de las líneas L002 (16"), L003 (20"), L004 (16"), L005 (24") y L007 (24"), ver Fig. 4.3.

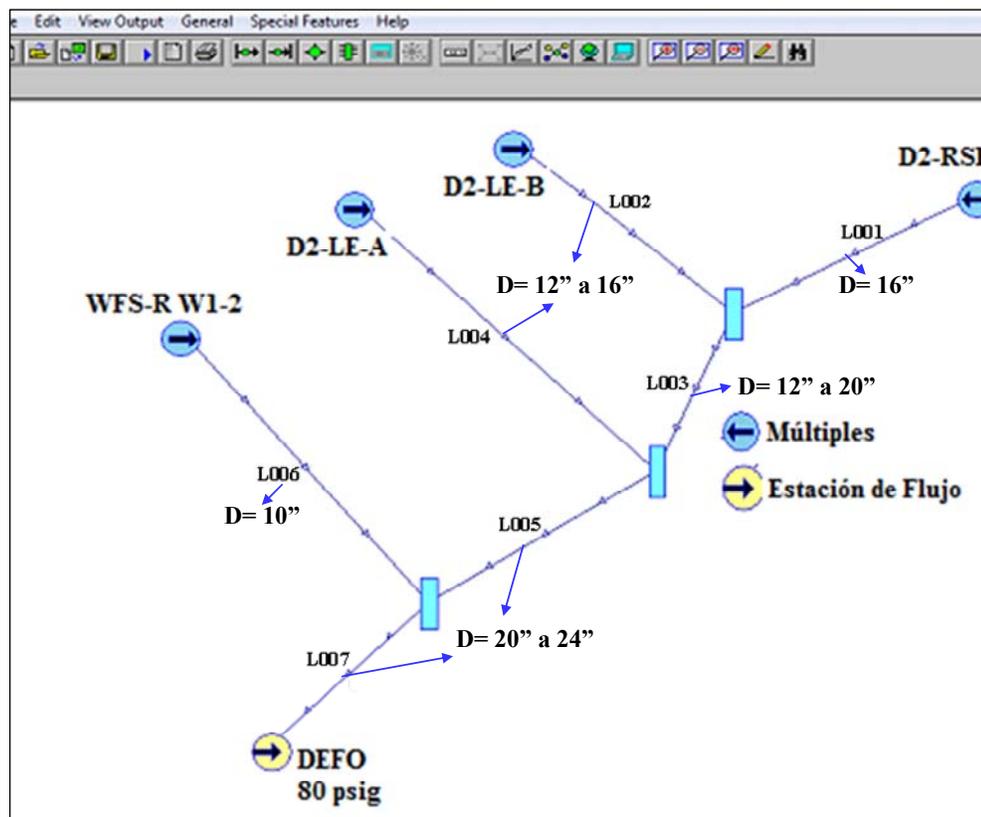


Figura 4.3. Esquema del sistema indicando los cambios de diámetros en las líneas de recolección de flujo (caso 1).

En la Tabla 4.8, se puede observar que las variaciones de las velocidades erosivas de cada una de las líneas de recolección de flujo (caso 1) no sobrepasan los valores de la Norma API RP 14E, pero estas velocidades erosivas sufren un aumento con respecto al sistema de recolección de flujo original. En la Tabla 4.9, se nota que con el aumento de los diámetros de las líneas L002, L003, L004, L005 y L007, la máxima caída de presión disminuye significativamente con respecto al sistema de flujo original y a las obtenidas por los Códigos y Normas ASME/ANSI B31.3. Sin embargo, en las líneas L001 y L006 la caída de presión no cumple con la obtenida por los códigos y normas (Ver APÉNDICE F y G).

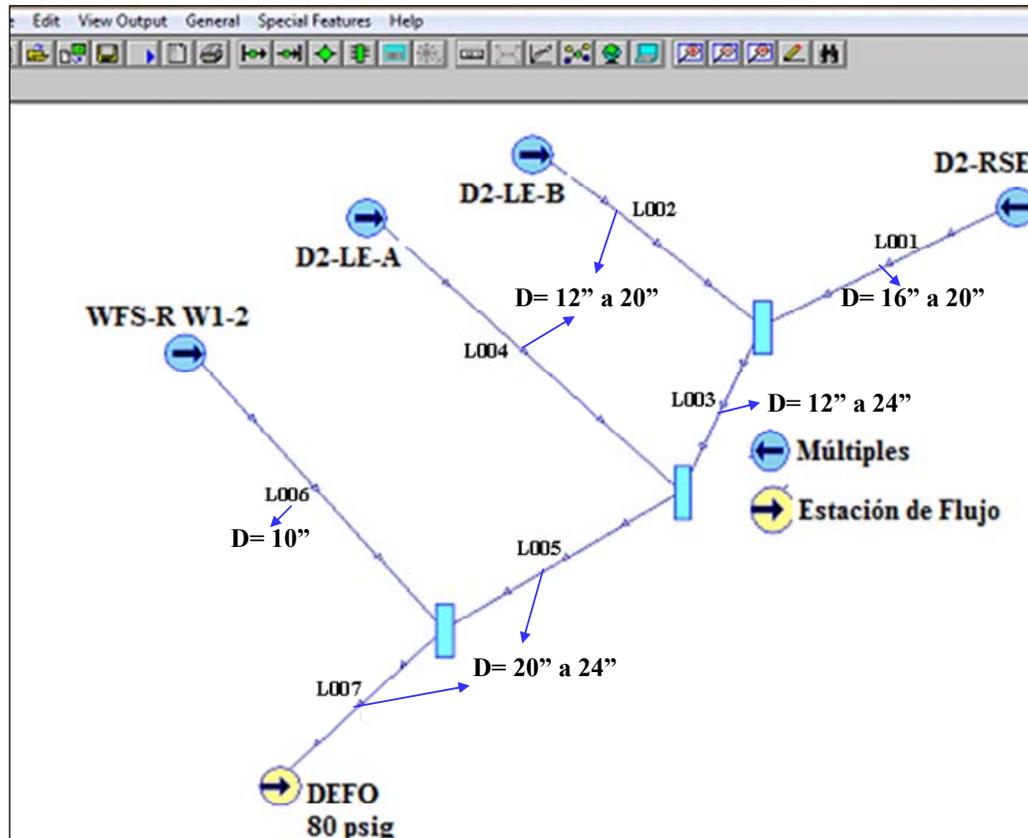
**Tabla 4.8. Comparación de las velocidades erosivas del caso 1 con el sistema de recolección de flujo original y la Norma API RP 14E**

| Líneas de salida múltiples | Diámetro (pulg) CASO 1 | Velocidad máxima de acuerdo a la Norma API-RP 14E (m/s) | Velocidad obtenida por el simulador PIPEPHASE (Sistema Original) (m/s) | Velocidad obtenida por el simulador PIPEPHASE (Caso 1) (m/s) |
|----------------------------|------------------------|---|--|--|
| L001                       | 16"                    | 10,782 – 11,537   | 8,23 – 8,47  | 8,49 – 8,81  |
| L002                       | 16"                    | 12,954 – 13,006   | 9,11 – 9,47  | 9,62   |
| L003                       | 20"                    | 12,71 – 12,82   | 9,01 – 9,033   | 9,1214 – 9,1241  |
| L004                       | 16"                    | 12,415 – 12,508   | 9,15 – 9,34  | 8,88 – 8,94  |
| L005                       | 24"                    | 12,800 – 13,490   | 9,16 – 9,38  | 9,377 – 9,472  |
| L006                       | 10"                    | 13,024 – 14,213   | 9,05 – 9,17  | 9,48 -9,501  |
| L007                       | 24"                    | 13,550 – 14,259   | 9,48 – 9,69  | 9,554 – 9,62   |

**Tabla 4.9. Comparación de las caídas de presión del caso 1 con el sistema de recolección de flujo original, los Códigos y Normas ASME/ANSI B31.3**

| Líneas de Salida múltiples | Diámetro (pulg) CASO 1 | Caída máxima de presión de acuerdo a la Norma (psi/100 pies) | Máxima caída de presión obtenida por el simulador PIPEPHASE (Sistema Original) (psi/100 pies) | Máxima caída de presión obtenida por el simulador PIPEPHASE (Caso 1) (psi/100 pies) |
|----------------------------|------------------------|--|---|---|
| L001                       | 16"                    | 0,4  | 0,33 - 0,37   | 0,36 - 0,41   |
| L002                       | 16"                    | 0,4  | 0,59 - 0,63   | 0,16 - 0,17   |
| L003                       | 20"                    | 0,4  | 3   | 0,28 - 0,282  |
| L004                       | 16"                    | 0,4  | 1   | 0,32 - 0,34   |
| L005                       | 24"                    | 0,4  | 0,83 - 0,9  | 0,28 - 0,29   |
| L006                       | 10"                    | 0,4  | 0,39 - 0,46   | 0,41 - 0,43   |
| L007                       | 24"                    | 0,4  | 1   | 0,36 - 0,37   |

**b) Caso 2.** Aumento de los diámetros de las líneas L001 (20"), L002 (20"), L003 (24"), L004 (20"), L005 (24") y L007 (24") ver Fig.4.4. No se aumenta el diámetro L006 porque esta línea no presenta ningún tipo de problema en la empresa



**Figura 4.4.** Esquema del sistema indicando los cambios de diámetros en las líneas (caso 2).

En la Tabla 4.10 se observa que las velocidades erosivas de cada una de las líneas de recolección de flujo (caso 2) no sobrepasan los valores de la Norma API RP 14E, y al compararlos con las velocidades del sistema de recolección de flujo original, se puede ver que estos valores disminuyeron en la mayoría de las líneas, siendo esto satisfactorio para el sistema de recolección del flujo, sólo la línea L006 la velocidad experimenta un aumento de 9,05 – 9,17 a 9,509 -9,51 m/s con respecto a la velocidad obtenida por el simulador en el sistema de recolección de flujo original (Ver APÉNDICE F y G).

**Tabla 4.10. Comparación de las velocidades erosivas del caso 2 con el sistema de recolección de flujo original y la Norma API RP 14E**

| Líneas de salida múltiples | Diámetro (pulg) CASO 2 | Velocidad máxima de acuerdo a la Norma API-RP 14E (m/s) | Velocidad obtenida por el simulador PIPEPHASE (Sistema Original) (m/s) | Velocidad obtenida por el simulador PIPEPHASE (Caso 2) (m/s) |
|----------------------------|------------------------|---|--|--|
| L001                       | 20"                    | 10,782 – 11,537   | 8,23 – 8,47  | 7,86 – 7,94  |
| L002                       | 20"                    | 12,954 – 13,006   | 9,11 – 9,47  | 8,75 – 8,79  |
| L003                       | 24"                    | 12,71 – 12,82   | 9,01 – 9,033   | 8,353 – 8,354  |
| L004                       | 20"                    | 12,415 – 12,508   | 9,15 – 9,34  | 8,3 – 8,31   |
| L005                       | 24"                    | 12,800 – 13,490   | 9,16 – 9,38  | 8,79 – 9,16  |
| L006                       | 10"                    | 13,024 – 14,213   | 9,05 – 9,17  | 9,509 -9,51  |
| L007                       | 24"                    | 13,550 – 14,259   | 9,48 – 9,69  | 9,553 – 9,61   |

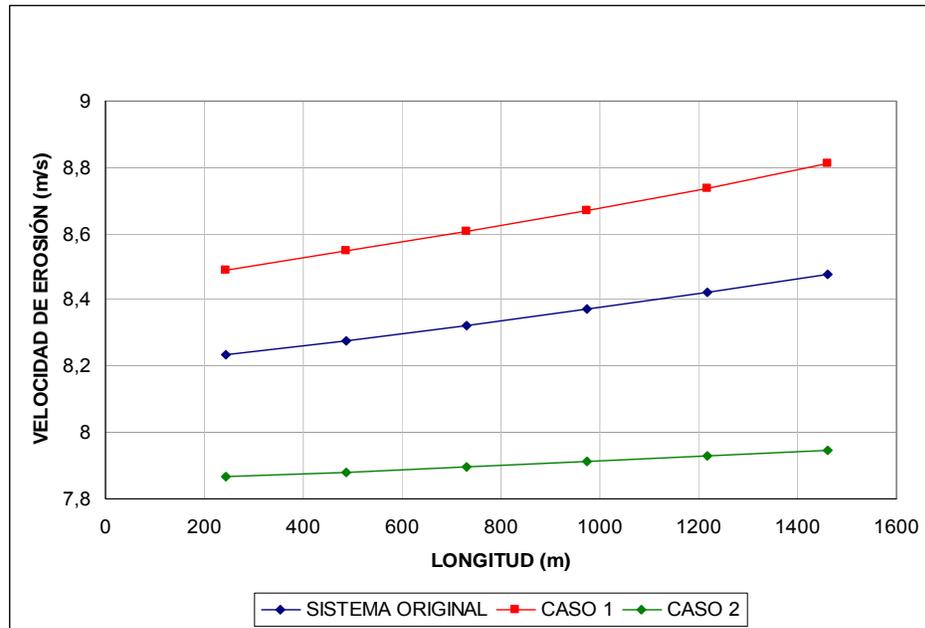
En la Tabla 4.11 se puede apreciar que con el aumento de los diámetros en las líneas L001, L002, L003, L004, L005 y L007, las máximas caídas de presión se reducen de una manera muy significativa con respecto al sistema de recolección de flujo original, y los Códigos y Normas ASME/ANSI B31.3. Sin embargo, la caída de presión en la línea L006 no cumple con la caída de presión obtenida por los códigos y normas (**Ver APÉNDICE F y G**).

**Tabla 4.11. Comparación de las caídas de presión del caso 2 con el sistema de recolección de flujo original, los Códigos y Normas ASME/ANSI B31.3**

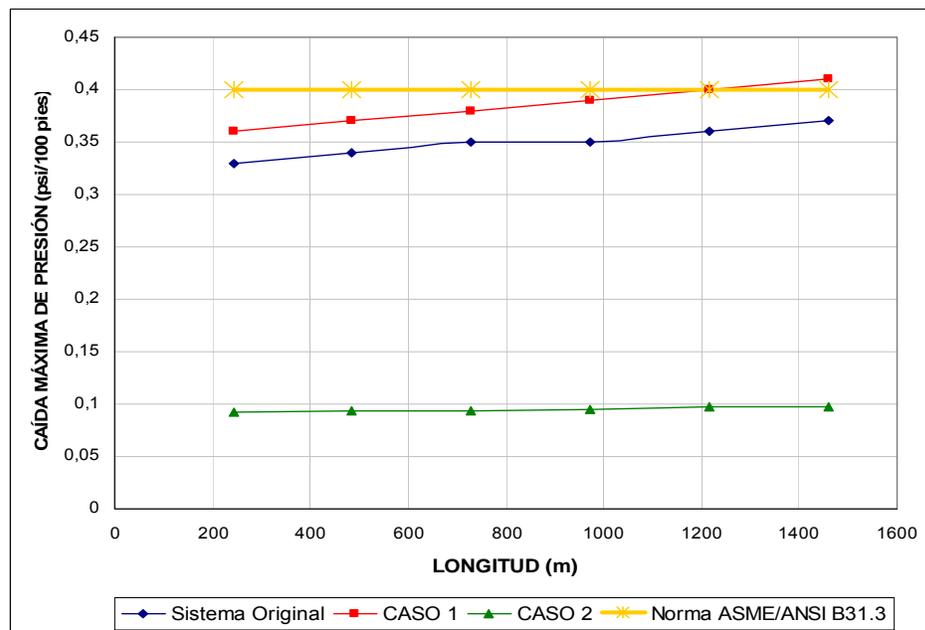
| Líneas de salida múltiples | Diámetro (pulg) CASO 2 | Caída máxima de presión de acuerdo a la Norma (psi/100 pies) | Caída máxima de presión obtenida por el simulador PIPEPHASE (Sistema Original) (psi/100 pies) | Caída máxima de presión obtenida por el simulador PIPEPHASE (Caso 2) (psi/100 pies) |
|----------------------------|------------------------|--|---|---|
| L001                       | 20"                    | 0,4  | 0,33 - 0,37   | 0,092 - 0,098   |
| L002                       | 20"                    | 0,4  | 0,59 - 0,63   | 0,043   |
| L003                       | 24"                    | 0,4  | 3   | 0,11  |
| L004                       | 20"                    | 0,4  | 1   | 0,11  |
| L005                       | 24"                    | 0,4  | 0,83 - 0,9  | 0,28 - 0,29   |
| L006                       | 10"                    | 0,4  | 0,39 - 0,46   | 0,41 - 0,43   |
| L007                       | 24"                    | 0,4  | 1   | 0,36 - 0,37   |

Para un mejor entendimiento del estudio de sensibilidad realizado, en las Fig. 4.6 hasta la Fig. 4.17 se muestran las gráficas de variación de la velocidad erosiva y la máxima caída de presión en función de la longitud en cada una de las líneas.

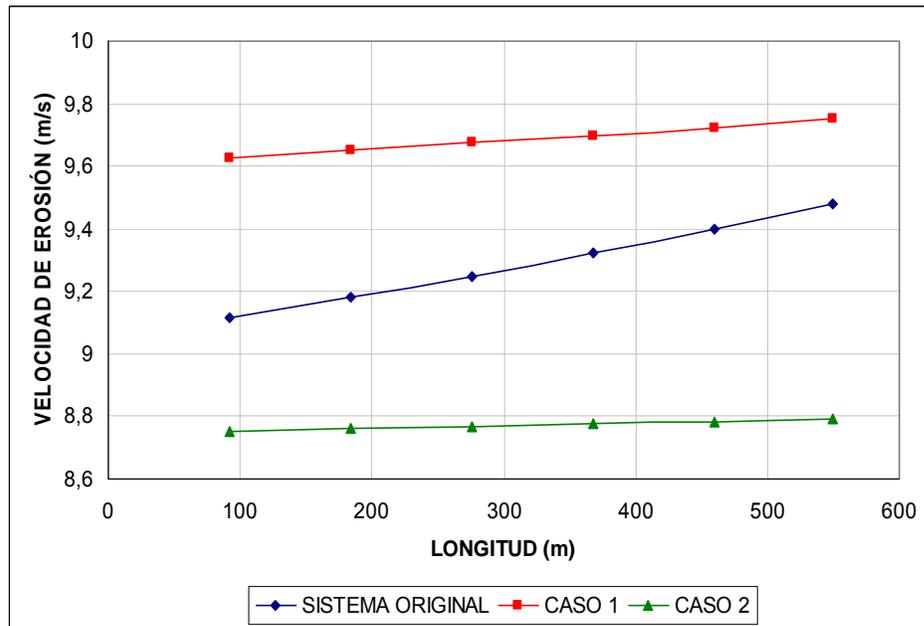
Desde la Fig. 4.5 hasta la Fig. 4.16, se evidencia como mejor opción para el sistema de recolección de flujo el Caso 2, ya que cumple con la Norma API RP 14E el cual expresa que el valor de la velocidad erosiva no debe exceder al valor de la velocidad erosiva del sistema original, y con los Códigos y Normas ASME/ANSI B31.3, los cuales establecen que para tuberías de acero al carbono la máxima caída de presión no debe exceder el valor de 0,4 psi/100 pies.



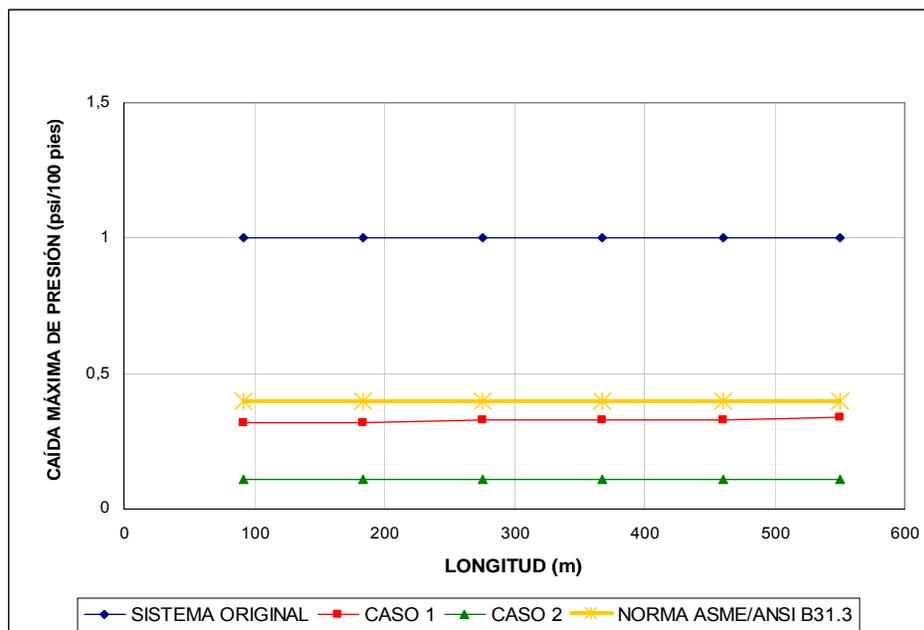
**Figura 4.5. Variación de las Velocidades Erosivas de la línea L001 (salida del múltiple D2-RSE) a lo largo de la línea.**



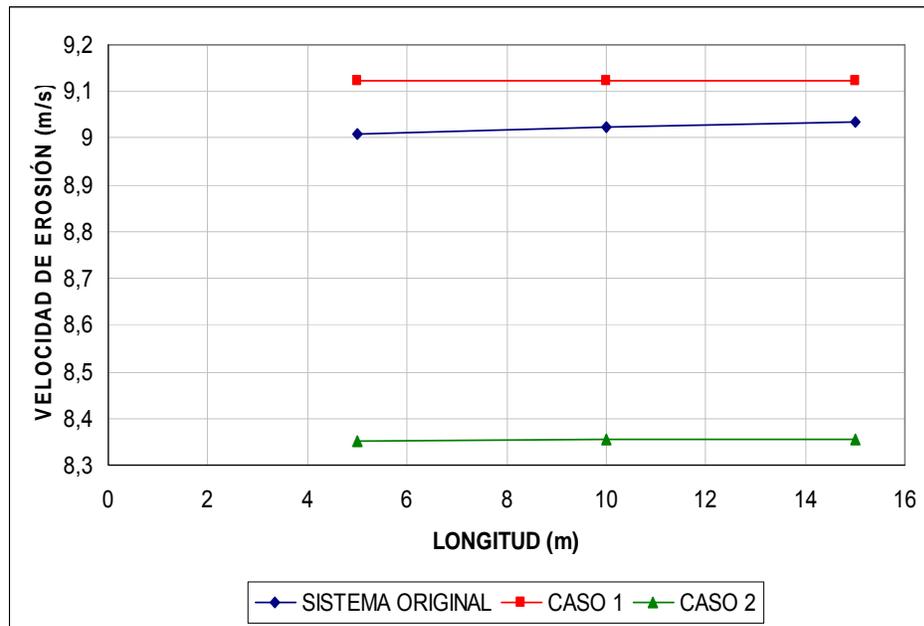
**Figura 4.6. Variación de la Máxima Caída de Presión de la línea L001 (salida del múltiple D2-RSE) a lo largo de la línea.**



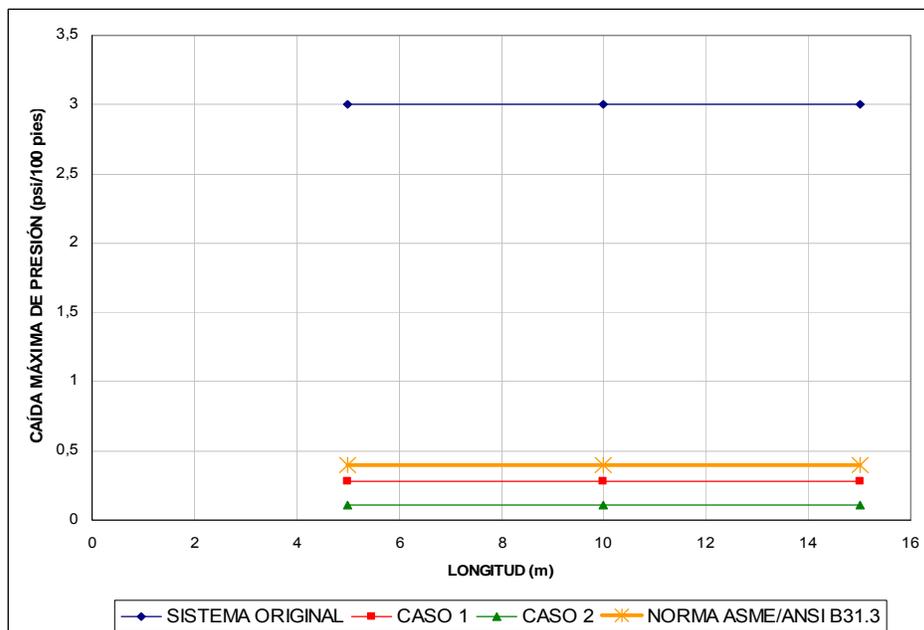
**Figura 4.7. Variación de las Velocidades Erosivas de la línea L002 (salida del múltiple D2-LE-B) a lo largo de la línea.**



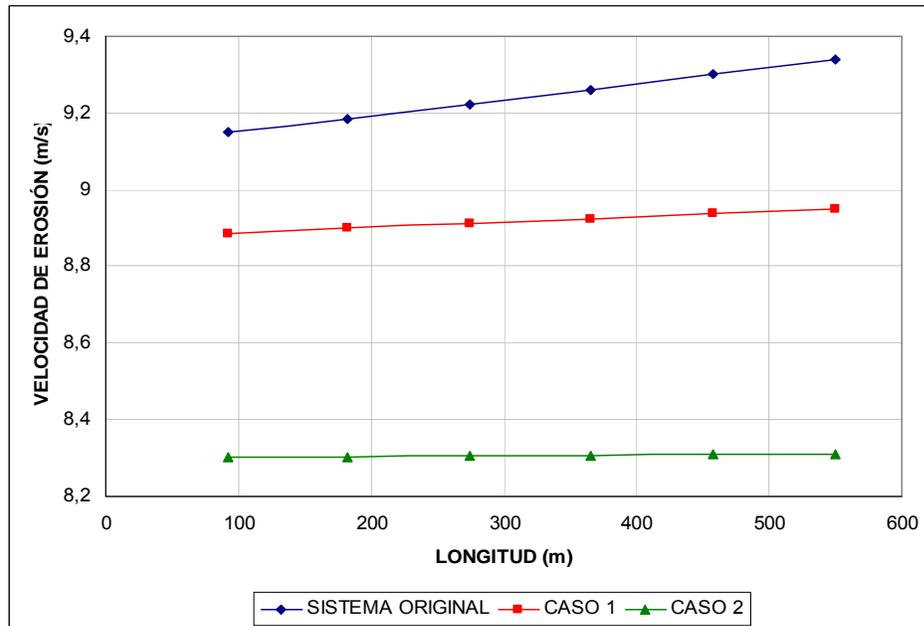
**Figura 4.8. Variación de la Máxima Caída de Presión de la línea L002 (salida del múltiple D2-LE-B) a lo largo de la línea.**



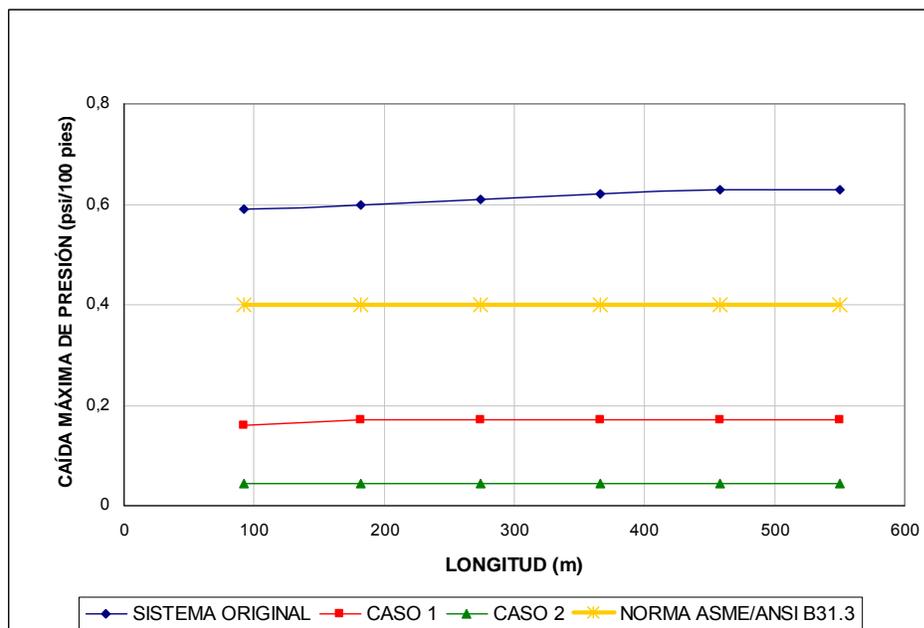
**Figura 4.9. Variación de las Velocidades Erosivas de la línea L003 (recolecta los fluidos de las líneas L001 y L002) a lo largo de la línea.**



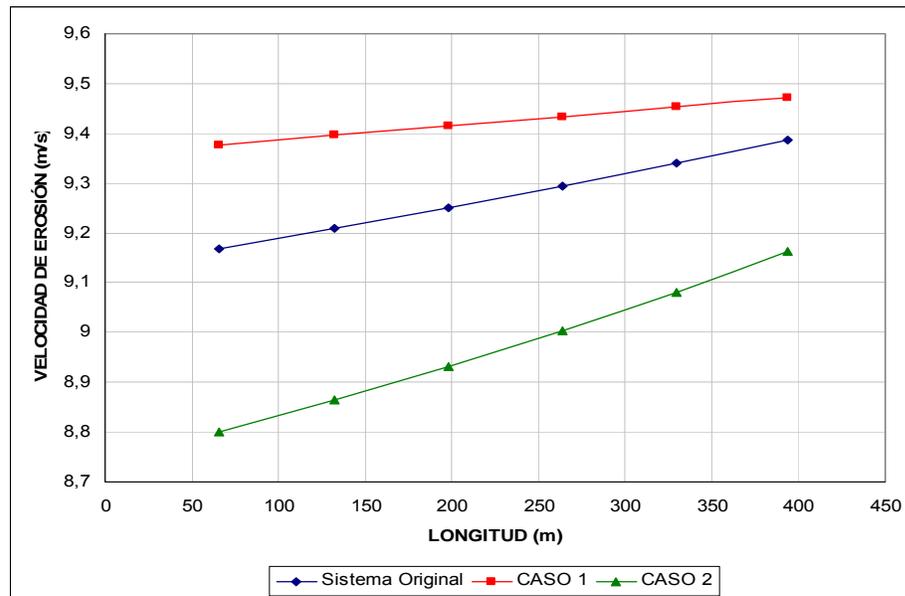
**Figura 4.10. Variación de la Máxima Caída de Presión de la línea L003 (recolecta los fluidos de las líneas L001 y L002) a lo largo de la línea.**



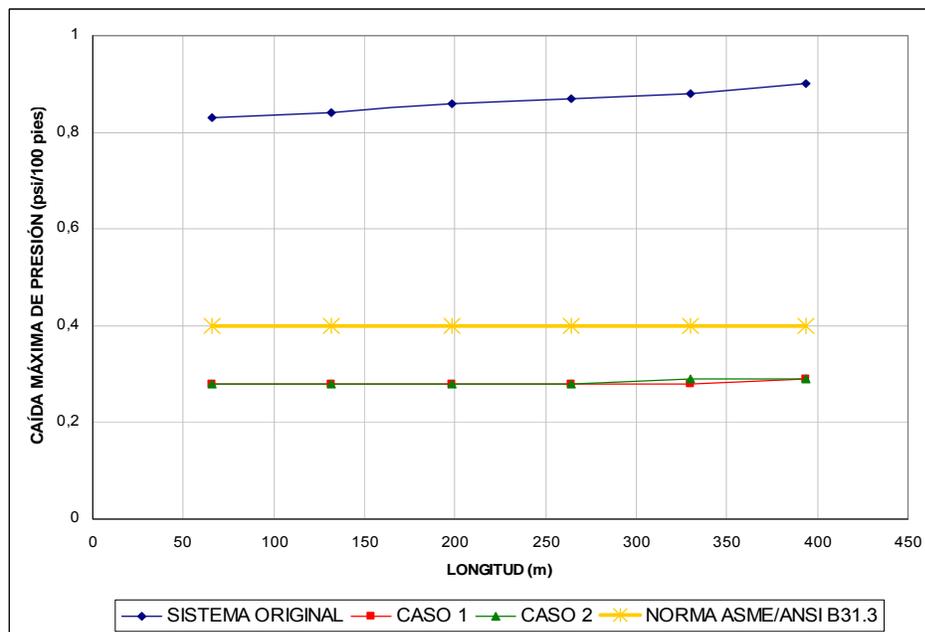
**Figura 4.11. Variación de las Velocidades Erosivas de la línea L004 (salida del múltiple D2-LE-A) a lo largo de la línea.**



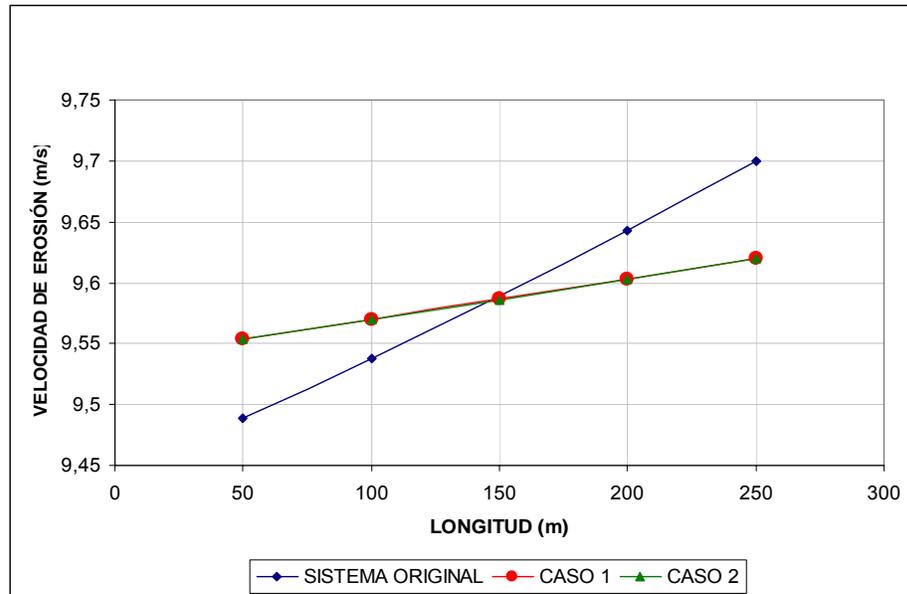
**Figura 4.12. Variación de la Máxima Caída de Presión de la línea L004 (salida del múltiple D2-LE-A) a lo largo de la línea.**



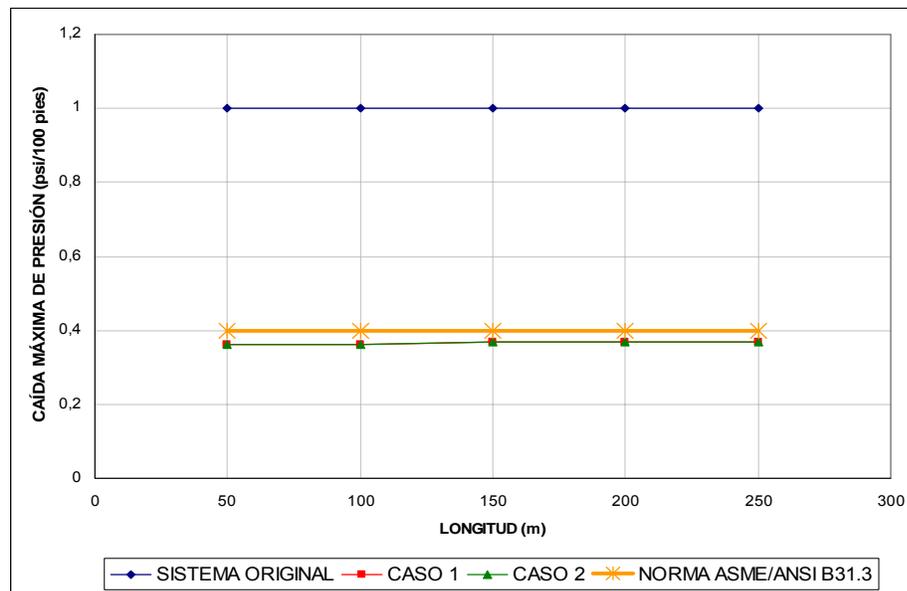
**Figura 4.13. Variación de las Velocidades Erosivas de la línea L005 (recolecta los fluidos de las líneas L001, L002, L003 y L004) a lo largo de la línea.**



**Figura 4.14. Variación de la Máxima Caída de Presión de la línea L005 (recolecta los fluidos de las líneas L001, L002, L003 y L004) a lo largo de la línea.**



**Figura 4.15. Variación de las Velocidades Erosivas de la línea L007 (recolecta los fluidos de las líneas L001, L002, L003, L004, L005 y L006) a lo largo de la línea.**



**Figura 4.16. Variación de la Máxima Caída de Presión de la línea L007 (recolecta los fluidos de las líneas L001, L002, L003, L004, L005 y L006) a lo largo de la línea.**

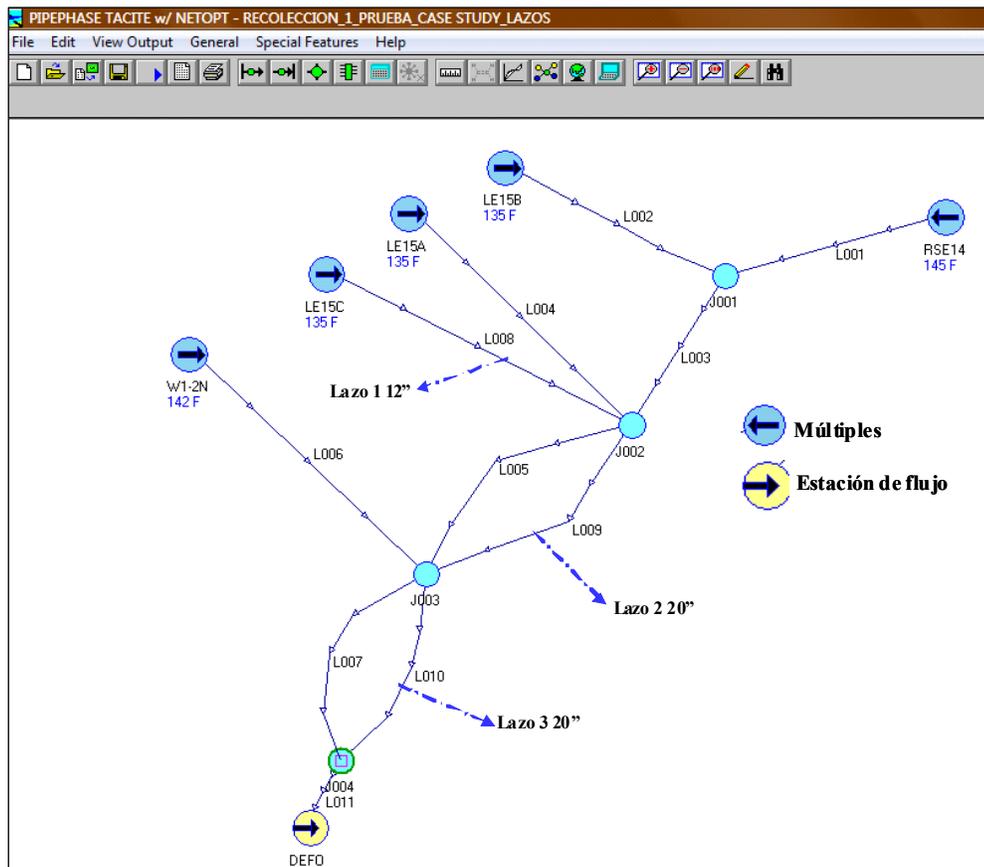
Es importante resaltar que en el análisis de sensibilidad realizado con el uso del simulador PIPEPHASE 8.1, sólo se modificaron las líneas que presentan problemas de erosión en el sistema original (L001, L002, L003, L004, L005 y L007), con excepción de la línea L006 proveniente del múltiple WFS-RW1-2.

#### **4.1.3 Segundo Estudio Hidráulico**

Una de las prácticas muy comunes aplicadas en la empresa es colocar líneas paralelas (lazos) a las líneas que presentan problemas de erosión, lo cual permite la distribución de manera equitativa de los fluidos y conlleva a la disminución de la caída de presión y las velocidades de flujo. Debido a esto, se realizó una nueva simulación (PIPEPHASE 8.1) que consistió en el cambio del sistema de recolección de flujo original, colocando líneas paralelas en aquellas que presentan problemas de erosión más relevantes, esto corresponde a las Líneas L002, L003, L004, L005 y L007. Se realizó este segundo estudio hidráulico del sistema de recolección de fluidos, tomando en cuenta el material que se tenía en el almacén de la compañía (tuberías de 0,3048 m (12”) y 0,4064 m (16’’)), para luego compararlo con los resultados del primer estudio hidráulico.

En el segundo estudio hidráulico para minimizar los efectos erosivos en las líneas L002 y L004, se rediseñó la salida del múltiple D2-L-EA y B, colocando una línea paralela (lazo 1, Línea L008) con el mismo diámetro y longitud de la existente, para dividir el fluido equitativamente por las tres líneas (L002, L004 y L008) para disminuir los efectos de desgaste. De igual forma, se realizó en las líneas L005 y L007 que son las encargadas de recolectar todos los fluidos provenientes de los múltiples adyacentes a la Unidad de Producción Dación, colocando las líneas paralelas L009 y L010 manteniendo los diámetros de 0,508 m (20’’), con longitudes de 394 m y 250 m respectivamente (**APÉNDICE H**).

En la Fig. 4.17 se muestra el diseño del sistema de recolección de los fluidos de la estación de flujo DEFO-2 con los lazos respectivos del segundo estudio hidráulico, conformado por las líneas L001 de 0,4064 m (16”), L002, L003, L004 y L008 de 0,3048 m (12”), L005, L007, L009 y L010 de 0,508 m (20”) y L006 de 0,254 m (10”).



**Figura 4.17. Diseño del Sistema de Recolección de flujo con líneas paralelas.**

Este estudio arrojó mejores resultados para las líneas L005 y L007 con lazos en cuanto a las máximas caídas de presión se refiere (Ver Tabla 4.12), obteniéndose valores por debajo de los Códigos y Normas ASME/ANSI B31.3, y una vez más las

velocidades erosivas no excedieron los valores calculados por la Norma API RP 14E (Ver Tabla 4.5).

**Tabla 4.12. Comparación de las velocidades erosivas y caídas de presión en las líneas L005 y L007 entre el Sistema Original y el Sistema con Lazos**

| Líneas                         | L005 Sin Lazos        | L005 con Lazos        | L007 Sin Lazos        | L007 con Lazos        |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Velocidad Erosiva (m/s)        | 9,1686<br>a<br>9,3873 | 9,1716<br>a<br>9,2563 | 9,4883<br>a<br>9,6997 | 9,5047<br>a<br>9,5656 |
| Caída de Presión (psi/100pies) | 0,83 -<br>0,9         | 0,26 -<br>0,27        | 1                     | 0,34 -<br>0,35        |

En la Tabla 4.13 se puede apreciar que en las líneas L002 y L004 con lazos, con un diámetro de 0,3048 m (12”) y longitud de 550 m, disminuyeron las máximas caídas de presión pero aún no cumplen con las caídas de presión de los Códigos y Normas ASME/ANSI B31.3 (0,4 psi/100pies), y las velocidades erosivas aumentaron, este incremento no se considera significativo ya que no sobrepasa el valor requerido por la Norma API RP 14E (Ver Tabla 4.5).

**Tabla 4.13. Comparación de las velocidades erosivas y caídas de presión en las líneas L002 y L004 entre el Sistema Original y el Sistema con Lazos**

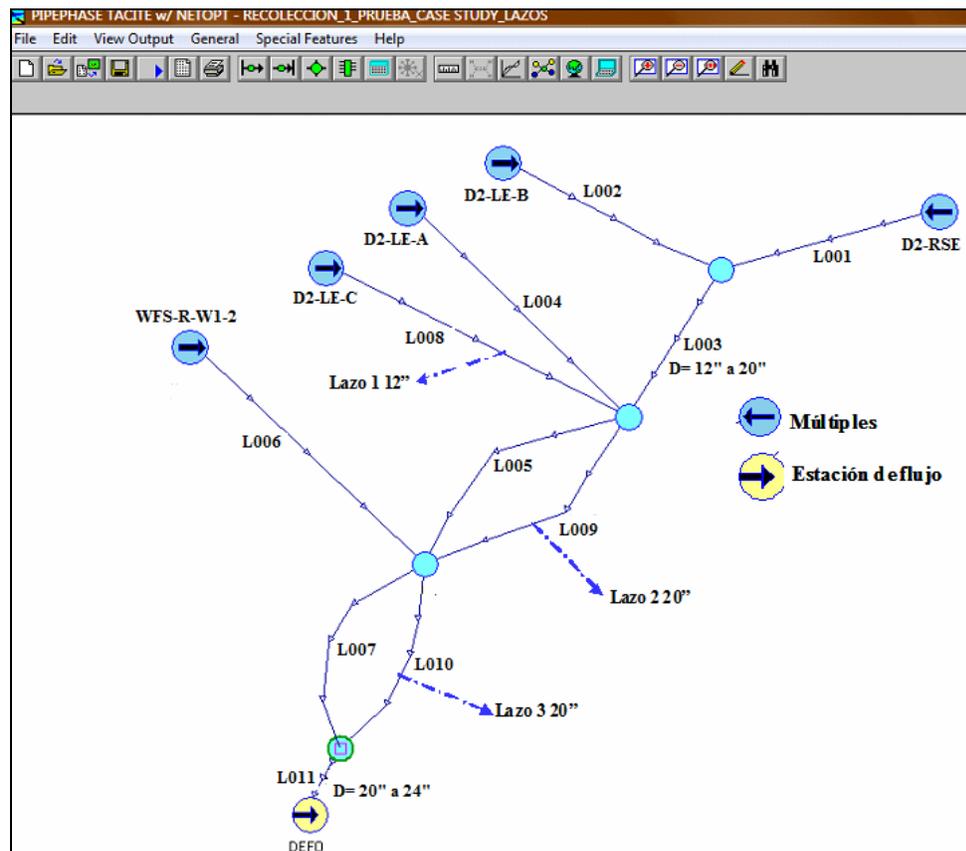
| Líneas                         | L002           | L002           | L004        | L004           |
|--------------------------------|----------------|----------------|-------------|----------------|
|                                | Sin Lazos      | con Lazos      | Sin Lazos   | con Lazos      |
| Velocidad Erosiva (m/s)        | 9,1508<br>a    | 9,4722<br>a    | 9,1156<br>a | 9,5077<br>a    |
|                                | 9,3407         | 9,6516         | 9,4799      | 9,6931         |
| Caída de Presión (psi/100pies) | 0,59 -<br>0,63 | 0,48 -<br>0,51 | 1           | 0,48 -<br>0,52 |

Por último, la línea L003 con lazos de 0,3048 m (12") de diámetro y longitud de 15 m no presentó ninguna mejora en cuanto a los parámetros de estudio (Ver Tabla 4.14), esto se debe a que esta línea posee un diámetro muy pequeño para la cantidad de fluido que pasa por esta línea, ya que recolecta los fluidos proveniente de las líneas L001 y L002.

**Tabla 4.14. Comparación de las velocidades erosivas y caída de presión en la línea L003 entre el Sistema Original y el Sistema con Lazos**

| Líneas                         | L003        | L003        |
|--------------------------------|-------------|-------------|
|                                | Sin Lazos   | con Lazos   |
| Velocidad Erosiva (m/s)        | 9,0106<br>a | 9,2886<br>a |
|                                | 9,0334      | 9,315       |
| Caída de Presión (psi/100pies) | 3           | 3           |

Por este motivo, se realizó una nueva simulación del sistema de recolección de flujo con lazos (caso 1 con lazos) manteniendo los diámetros de las líneas L001, L002, L004, L005, L006 y L007, los lazos L008, L009 y L010, aumentando los diámetros de la línea L003 de 0,3048 m (12") a 0,508 m (20") y de la línea L011 de 0,508 m (20") a 0,6096 m (24") respectivamente (Ver Fig. 4.18).



**Figura 4.18. Esquema del sistema con lazos indicando los cambios de diámetros en las líneas L003 y L011.**

Esta nueva simulación (caso 1 con lazos) no se presentaron cambios significativos en las velocidades erosivas y las máximas caídas de presión en las líneas L005 y L007 en comparación con los resultados obtenidos anteriormente (Ver Tabla 4.15), También no se presentaron cambios significativos en los resultados en

las líneas L002 y L004 solo que las máximas caídas de presión no cumplieron con lo establecido en los códigos y normas (Ver Tabla 4.16). La velocidad erosiva aumentó un poco pero no sobrepasó el valor de la norma API RP 14E (Ver Tabla 4.5).

**Tabla 4.15. Comparación de las velocidades erosivas y caídas de presión en las líneas L005 y L007 entre el Sistema Original, el Sistema con Lazos y el Caso 1 con Lazos**

| Líneas                               | L005<br>Sin Lazos     | L005<br>con Lazos     | L005<br>caso 1 con<br>Lazos (↑Ø) | L007<br>Sin Lazos     | L007<br>con Lazos     | L007<br>caso 1 con<br>Lazos (↑Ø) |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Velocidad<br>Erosiva (m/s)           | 9,1686<br>a<br>9,3873 | 9,1716<br>a<br>9,2563 | 9,1845<br>a<br>9,2700            | 9,4883<br>a<br>9,6997 | 9,5047<br>a<br>9,5656 | 9,5167<br>a<br>9,5782            |
| Caída de<br>Presión<br>(psi/100pies) | 0,83 -<br>0,9         | 0,26 -<br>0,27        | 0,26 -<br>0,27                   | 1                     | 0,34 -<br>0,35        | 0,34 -<br>0,35                   |

**Tabla 4.16. Comparación de las velocidades erosivas y caídas de presión en las líneas L002 y L004 entre el Sistema Original, el Sistema con Lazos y el Caso 1 con Lazos**

| Líneas                               | L002<br>Sin Lazos     | L002<br>con Lazos     | L002<br>caso 1 con<br>Lazos (↑Ø) | L004<br>Sin Lazos     | L004<br>con Lazos     | L004<br>caso 1 con<br>Lazos (↑Ø) |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Velocidad<br>Erosiva (m/s)           | 9,1508<br>a<br>9,3407 | 9,4722<br>a<br>9,6516 | 9,5147<br>a<br>9,7007            | 9,1156<br>a<br>9,4799 | 9,5077<br>a<br>9,6931 | 9,5174<br>a<br>9,7043            |
| Caída de<br>Presión<br>(psi/100pies) | 0,59 -<br>0,63        | 0,48 -<br>0,51        | 0,48 -<br>0,52                   | 1                     | 0,48 -<br>0,52        | 0,48 -<br>0,52                   |

Con respecto a la línea L003 (caso 1 con lazos), se presentaron cambios muy satisfactorios en comparación con el sistema original y el sistema con lazos, disminuyendo los valores de las máximas caída de presión cumpliendo con los Códigos y Normas ASME/ANSI B31.3 (Ver Tabla 4.17).

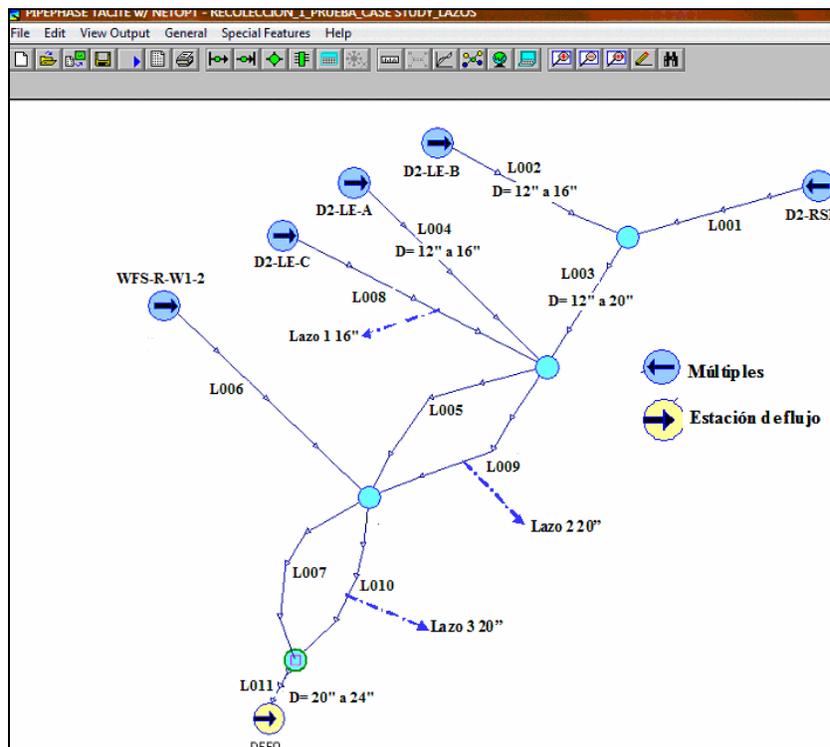
**Tabla 4.17. Comparación de las velocidades erosivas y caída de presión en la línea L003 entre el Sistema Original, el Sistema con Lazos y el Caso 1 con Lazos**

| Líneas                                | L003 Sin Lazos     | L003 con Lazos    | L003 caso 1 con Lazos ( $\uparrow\emptyset$ ) |
|---------------------------------------|--------------------|-------------------|---|
| <b>Velocidad Erosiva (m/s)</b>        | 9,0106 a<br>9,0334 | 9,2886 a<br>9,315 | 8,9544 a<br>8,9567                            |
| <b>Caída de Presión (psi/100pies)</b> | 3                  | 3                 | 0,25  |

De acuerdo a todos los resultados obtenidos (Ver Tabla 4.17), se observó que en el cambio de diámetros solo fue favorecida la línea L003. En vista de esto, se realizó otra simulación (caso 2 con lazos) cambiando los diámetros de las líneas L002, L004 y el lazo L008 de 0,3048 m (12") a un diámetro mayor de 0,4064 m (16") (Ver Fig. 4.19), dando como resultado valores de velocidad erosiva y máxima caída de presión mas acordes para el mejor funcionamiento del sistema de recolección de flujo, como se puede observar en las Tablas 4.18, 4.19 y 4.20.

**Tabla 4.18. Comparación de las velocidades erosivas y caídas de presión en las líneas L005 y L007 entre el Sistema Original, el Sistema con Lazos, el Caso 1 con Lazos y el Caso 2 con Lazos**

| Líneas                         | L005 Sin Lazos        | L005 con Lazos        | L005 caso 1 con Lazos ( $\uparrow\emptyset$ ) | L005 caso 2 con Lazos ( $\uparrow\emptyset$ ) | L007 Sin Lazos        | L007 con Lazos        | L007 caso 1 con Lazos ( $\uparrow\emptyset$ ) | L007 caso 2 con Lazos ( $\uparrow\emptyset$ ) |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|---|---|-----------------------|-----------------------|---|---|
| Velocidad Erosiva (m/s)        | 9,1686<br>a<br>9,3873 | 9,1716<br>a<br>9,2563 | 9,1845<br>a<br>9,2700                         | 9,183<br>a<br>9,2686                          | 9,4883<br>a<br>9,6997 | 9,5047<br>a<br>9,5656 | 9,5167<br>a<br>9,5782                         | 9,5156<br>a<br>9,5771                         |
| Caída de Presión (psi/100pies) | 0,83<br>a<br>0,9      | 0,26<br>a<br>0,27     | 0,26<br>a<br>0,27                             | 0,26<br>a<br>0,27                             | 1                     | 0,34<br>a<br>0,35     | 0,34<br>a<br>0,35                             | 0,34<br>a<br>0,35                             |



**Figura 4.19. Esquema del sistema con lazos (Caso 2) indicando los cambios de diámetros en las líneas L002, L004 y Lazo L008.**

**Tabla 4.19. Comparación de las velocidades erosivas y caídas de presión en las líneas L002 y L004 entre el Sistema Original, el Sistema con Lazos, el Caso 1 con Lazos y el Caso 2 con Lazos**

| Líneas                         | L002 Sin Lazos        | L002 con Lazos        | L002 caso 1 con Lazos ( $\uparrow\emptyset$ ) | L002 caso 2 con Lazos ( $\uparrow\emptyset$ ) | L004 Sin Lazos        | L004 con Lazos        | L004 caso 1 con Lazos ( $\uparrow\emptyset$ ) | L004 caso 2 con Lazos ( $\uparrow\emptyset$ ) |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|---|---|-----------------------|-----------------------|---|---|
| Velocidad Erosiva (m/s)        | 9,1508<br>a<br>9,3407 | 9,4722<br>a<br>9,6516 | 9,5147<br>a<br>9,7007                         | 8,6388<br>a<br>8,6785                         | 9,1156<br>a<br>9,4799 | 9,5077<br>a<br>9,6931 | 9,5174<br>a<br>9,7043                         | 8,6419<br>a<br>8,6818                         |
| Caída de Presión (psi/100pies) | 0,59<br>a<br>0,63     | 0,48<br>a<br>0,51     | 0,48<br>a<br>0,52                             | 0,12  | 1                     | 0,48<br>a<br>0,52     | 0,48<br>a<br>0,52                             | 0,12  |

**Tabla 4.20. Comparación de las velocidades erosivas y caída de presión en la línea L003 entre el Sistema Original, el Sistema con Lazos, el Caso 1 con Lazos y el Caso 2 con Lazos**

| Líneas                         | L003 Sin Lazos        | L003 con Lazos       | L003 caso 1 con Lazos ( $\uparrow\emptyset$ ) | L003 caso 2 con Lazos ( $\uparrow\emptyset$ ) |
|--------------------------------|-----------------------|----------------------|---|---|
| Velocidad Erosiva (m/s)        | 9,0106<br>a<br>9,0334 | 9,2886<br>a<br>9,315 | 8,9544<br>a<br>8,9567                         | 8,9535<br>a<br>8,9557                         |
| Caída de Presión (psi/100pies) | 3                     | 3                    | 0,25  | 0,25  |

Tomando en consideración todos los análisis de sensibilidad realizados con el simulador PIPEPHASE 8.1 al sistema original, se puede decir que la forma más apropiada para dicho sistema resultó ser el Caso 2 de la primera simulación, donde se cambiaron los diámetros de las líneas L002, L004 de 0,3048 m (12") a 0,508 m (20"), las líneas L005 y L007 de 0,508 m (12") a 0,6096 m (24"), la línea L003 de 0,3048 m

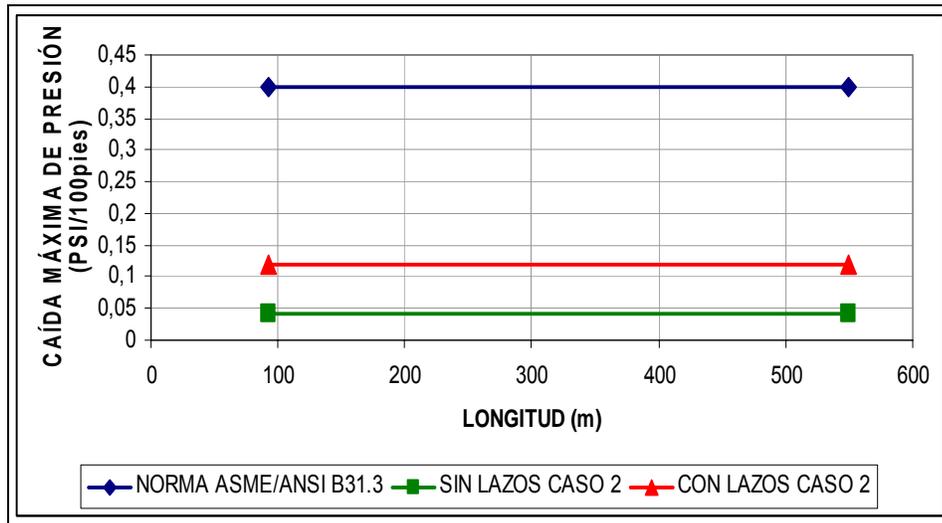
(12”) a 0,508 m (20”) y se mantuvieron los diámetros de las líneas L001 y L006 constantes, ya que en este caso se disminuyen las velocidades erosivas y caídas de presión significativas (Ver Figs. 4.5 a 4.16).

Por política de la empresa y para abaratar los costos, se incrementaron los diámetros de las que provienen del múltiple D2-L-E A y B, y el lazo colocado en este múltiple varió de 0,3048 m (12”) a 0,4064 m (16”) de 550 m de longitud y a la línea L003 varió de 0,3048 m (12”) a 0,508 m (20”) de 15 m de longitud (segundo sistema hidráulico), ya que con esto se logró un resultado similar al Caso 2 del sistema original sin lazos. En la Tabla 4.21 se muestra la comparación de estos resultados con el sistema con lazos.

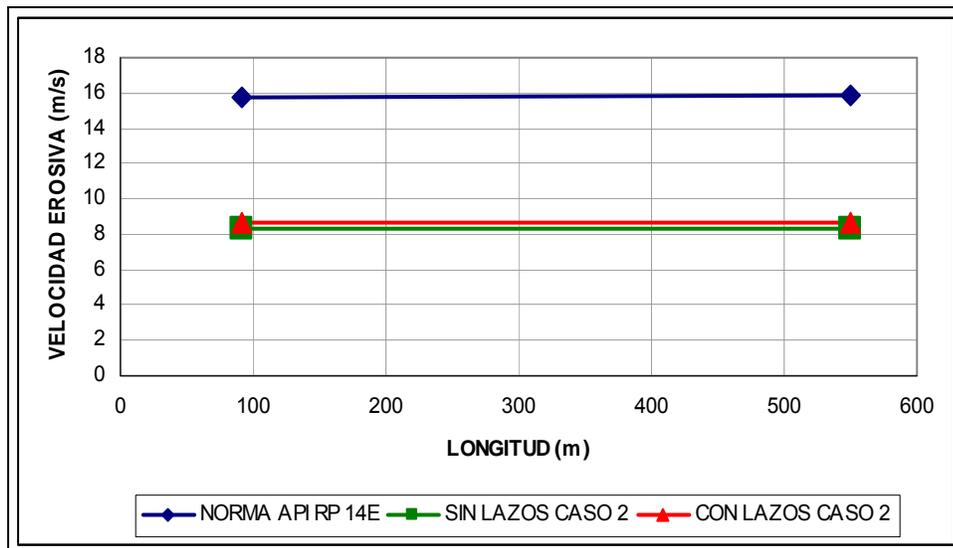
**Tabla 4.21. Comparación de las velocidades erosivas y caídas de presión entre el Sistema Original (Caso 2) y el Sistema con Lazos (Caso 2)**

| Líneas                         | L002 Sin Lazos   | L002 caso 2 con Lazos (↑Ø) | L003 Sin Lazos  | L003 caso 2 con Lazos (↑Ø) | L004 Sin Lazos   | L004 caso 2 con Lazos (↑Ø) | L005 Sin Lazos    | L005 caso 2 con Lazos (↑Ø) | L007 Sin Lazos    | L007 caso 2 con Lazos (↑Ø) |
|--------------------------------|------------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|------------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|
| Velocidad Erosiva (m/s)        | 8,3005<br>8,3049 | 8,6388<br>8,6785           | 8,3531<br>8,354 | 8,9535<br>8,9557           | 8,7527<br>8,7909 | 8,6419<br>8,6818           | 8,7995<br>9,1629  | 9,183<br>9,2686            | 9,5534<br>9,6197  | 9,5167<br>9,5782           |
| Caída de Presión (psi/100pies) | 0,043            | 0,12                       | 0,11            | 0,25                       | 0,11             | 0,12                       | 0,28<br>a<br>0,29 | 0,26<br>a<br>0,27          | 0,36<br>a<br>0,37 | 0,34<br>a<br>0,35          |

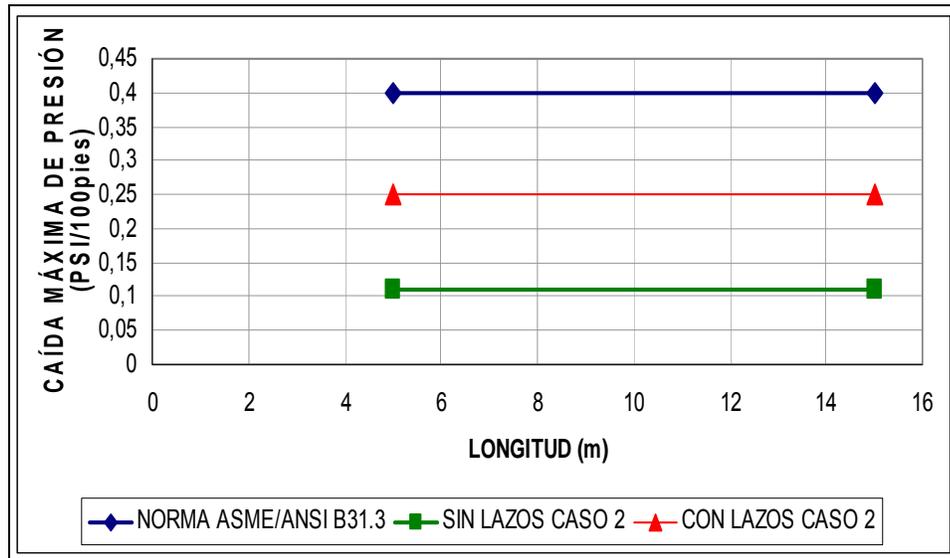
Para un mejor entendimiento de la Tabla 4.21 se muestran las gráficas de cada una de las líneas del sistema de recolección de flujo por separado, comparando la caída máxima de presión y la velocidad erosiva en función de la longitud (Ver Figs. 4.20 a 4.30).



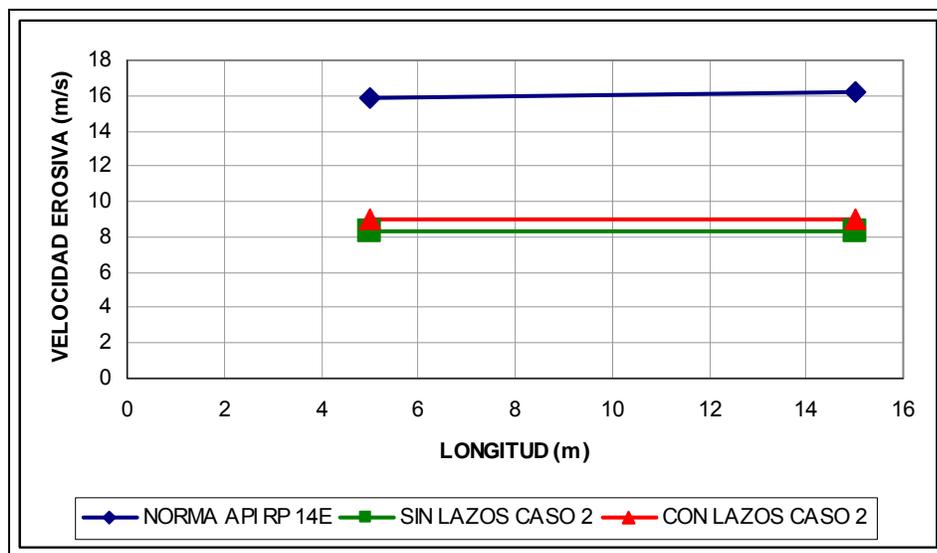
**Figura 4.20. Variación de la Caída de Presión en la línea L002 (salida del múltiple D2-LE-B) para el sistema con y sin lazos (caso 2).**



**Figura 4.21. Variación de las Velocidades Erosivas en la línea L002 (salida del múltiple D2-LE-B) para el sistema con y sin lazos (caso 2).**



**Figura 4.22.** Variación de la Caída de Presión en la línea L003 (recolecta los fluidos de las líneas L001 y L002) para el sistema con y sin lazos (caso 2).



**Figura 4.23.** Variación de las Velocidades Erosivas en la línea L003 (recolecta los fluidos de las líneas L001 y L002) para el sistema con y sin lazos (caso 2).

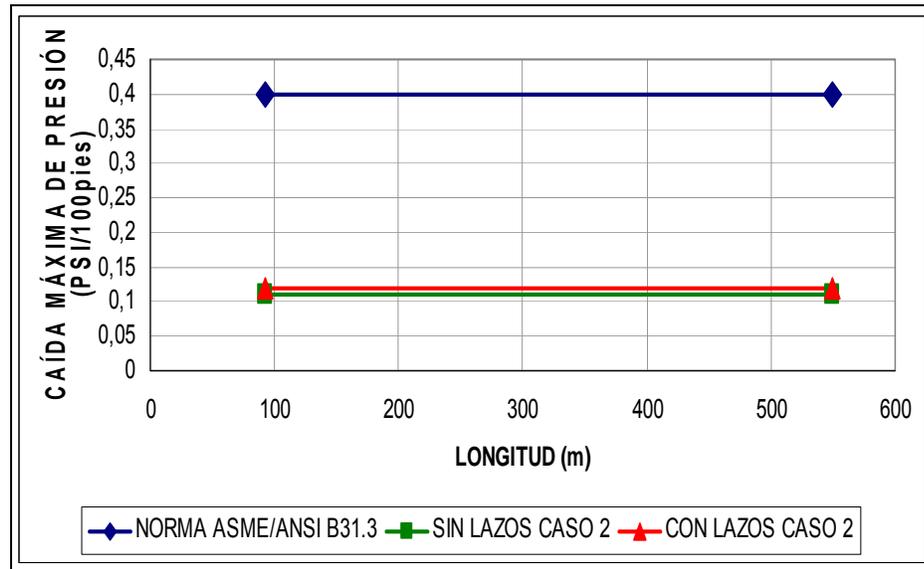


Figura 4.24. Variación de la Caída de Presión en la línea L004 (salida del múltiple D2-LE-A) para el sistema con y sin lazos (caso 2).

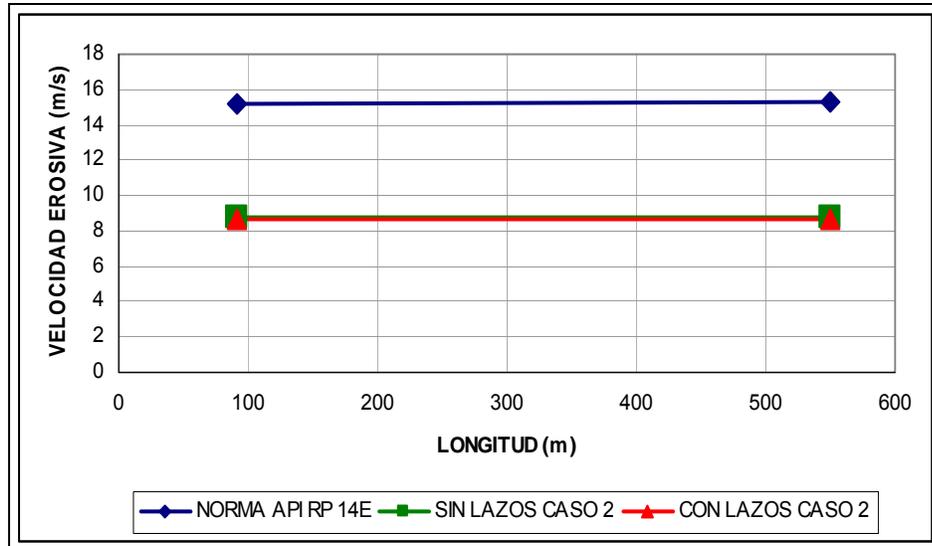
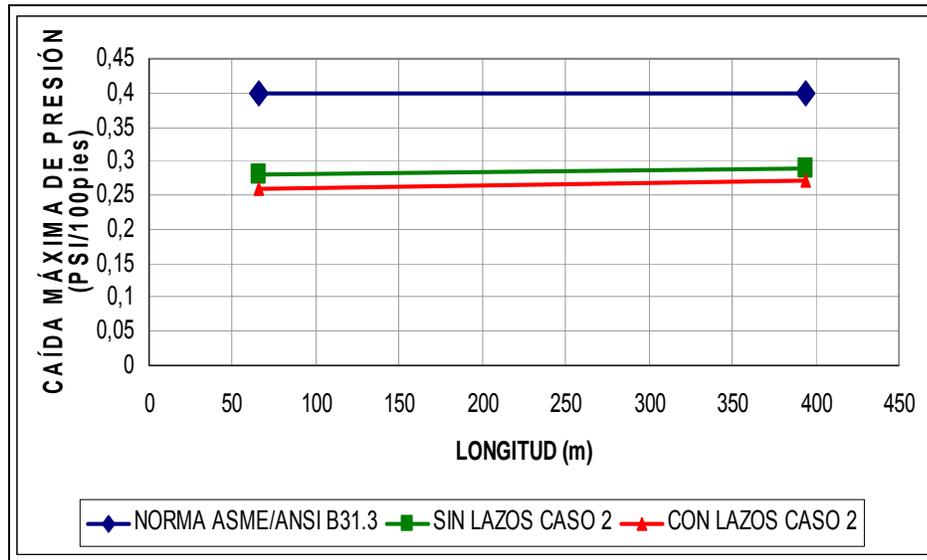
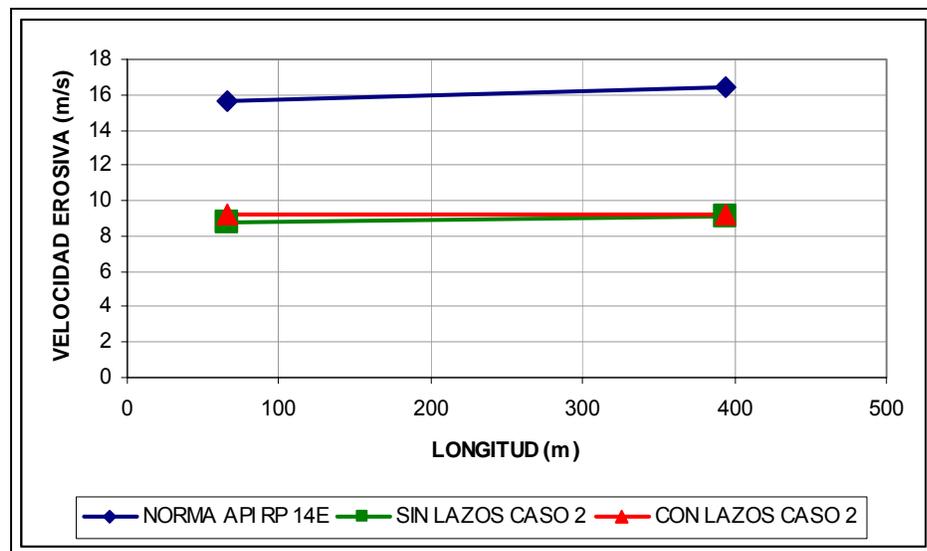


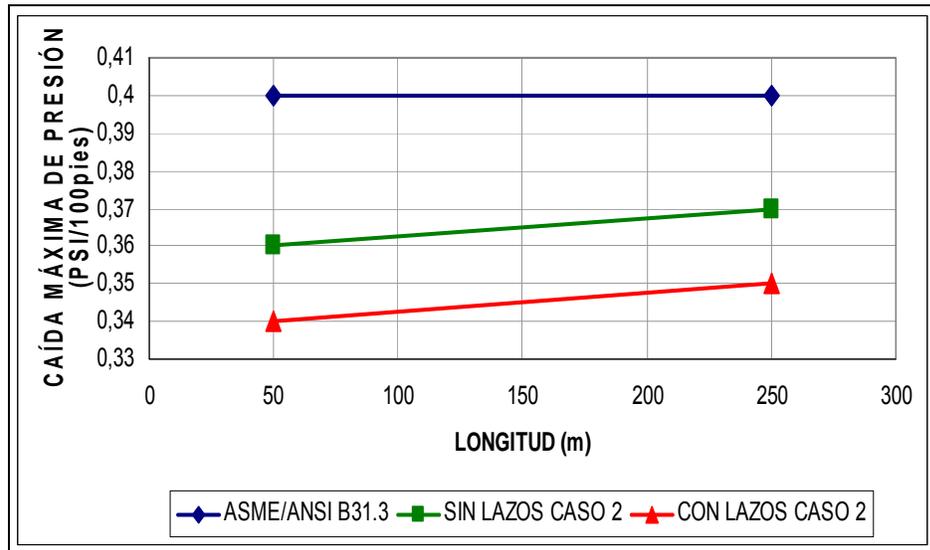
Figura 4.25. Variación de las Velocidades Erosivas en la línea L004 (salida del múltiple D2-LE-A) para el sistema con y sin lazos (caso 2).



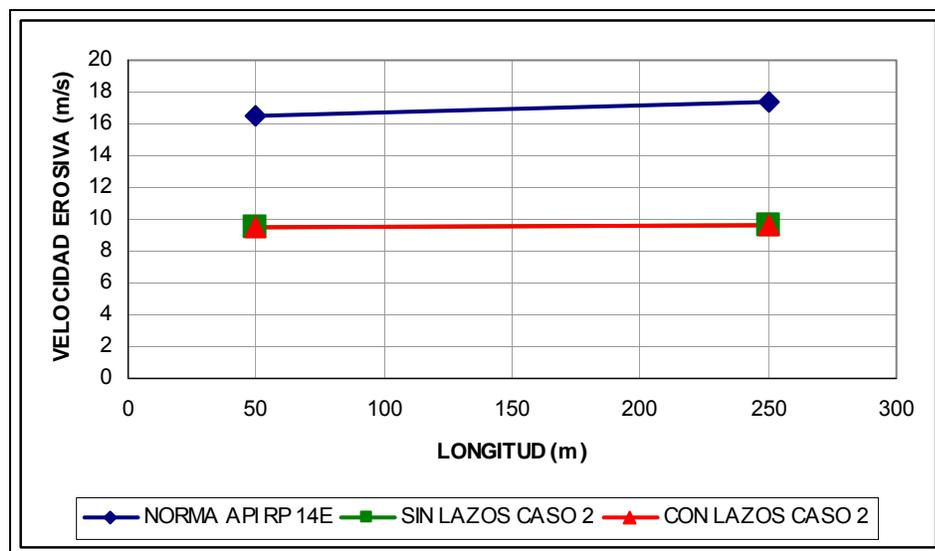
**Figura 4.26.** Variación de la Caída de Presión en la línea L005 (recolecta los fluidos de las líneas L001, L002, L003 y L004) para el sistema con y sin lazos (caso 2).



**Figura 4.27.** Variación de las Velocidades Erosivas en la línea L005 (recolecta los fluidos de las líneas L001, L002, L003 y L004) para el sistema con y sin lazos (caso 2).



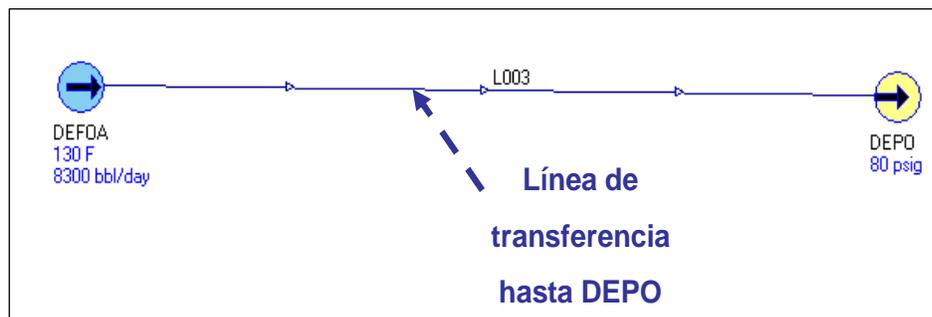
**Figura 4.28.** Variación de la Caída de Presión en la línea L007 (recolecta los fluidos de las líneas L001, L002, L003, L004, L005 y L006) para el sistema con y sin lazos (caso 2).



**Figura 4.29.** Variación de las Velocidades Erosivas en la línea L007 (recolecta los fluidos de las líneas L001, L002, L003, L004, L005 y L006) para el sistema con y sin lazos (caso 2).

#### 4.1.4 Determinación de las velocidades erosivas en la línea de transferencia DEPO (Estación Principal)

En esta etapa se realizó un estudio hidráulico con el simulador PIPEPHASE 8.1, para determinar la velocidad erosiva y caída máxima de presión en la línea de transferencia de DEFO-2 hasta DEPO (Ver Fig. 4.30 y APÉNDICE I).



**Figura 4.30. Diseño del Sistema de la línea de transferencia hasta DEPO.**

De acuerdo con la Norma API RP 14E la velocidad erosiva de esta línea fue de 11,4081 m/s. Al realizar la simulación del sistema original se obtuvo una velocidad erosiva que no sobrepasaba el valor de la norma (Ver Tabla 4.22), pero al comparar la máxima caída de presión se observó que no cumplió con los códigos y normas ASME/ANSI B31.3 (Ver Tabla 4.23). Por ello se llevó a cabo otro análisis hidráulico a esta línea de transferencia de los fluidos, utilizando el simulador PIPEPHASE 8.1, el cual consistió en aumentar el diámetro de la línea de 12" a 16" y disminuir el diámetro de esta de 12" a 10" para ver su influencia en la velocidad erosiva y caída de presión a lo largo de la línea.

Los estudios de este análisis hidráulico permitieron inferir que la velocidad de erosión en la línea de transferencia no era la causa del problema, ya que cumplía con lo establecido en las Normas API RP 14E (Ver Tabla 4.22), pero al observar los

resultados de la máxima caída de presión se observó que con el aumento de diámetro de la línea de transferencia de 12" a 16" se cumplía con lo establecido con los Códigos y Normas ASME/ANSI B31.3 (Ver Tabla 4.23).

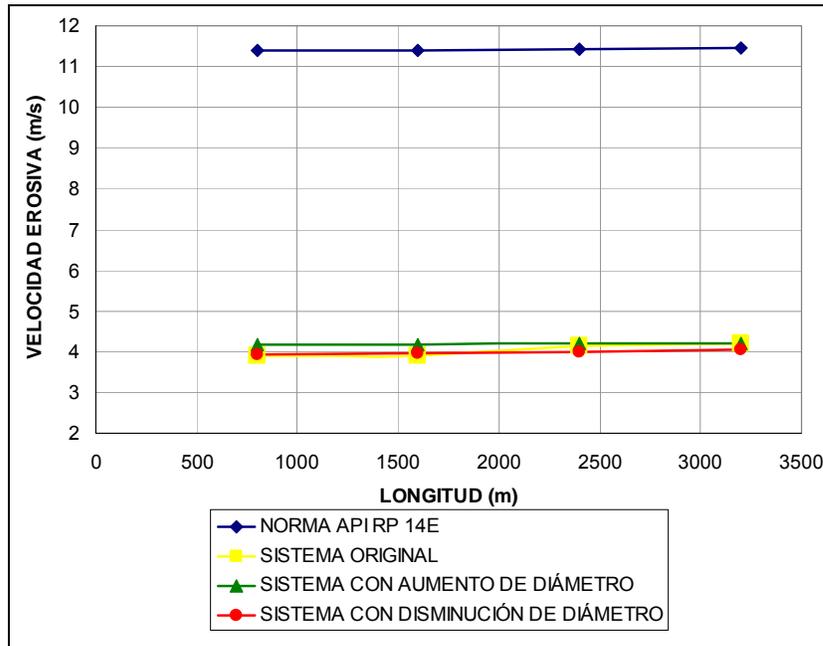
**Tabla 4.22. Variación de la velocidad erosiva de cada uno de los casos en comparación con la Norma API RP 14E**

| Línea salida DEFO-2 | Velocidad máxima de acuerdo a la Norma API-RP 14E (m/s) | Velocidad Erosiva (Sistema Original 12") (m/s) | Velocidad Erosiva (Caso 1 ↑Ø de 12" a 16") (m/s) | Velocidad Erosiva (Caso 2 ↓Ø de 12" a 10") (m/s) |
|---------------------|---|--|--|--|
| L001                | 11,408 –<br>11,441                                      | 3,91 –<br>4,194                                | 4,1748 –<br>4,219                                | 3,936 –<br>4,063                                 |

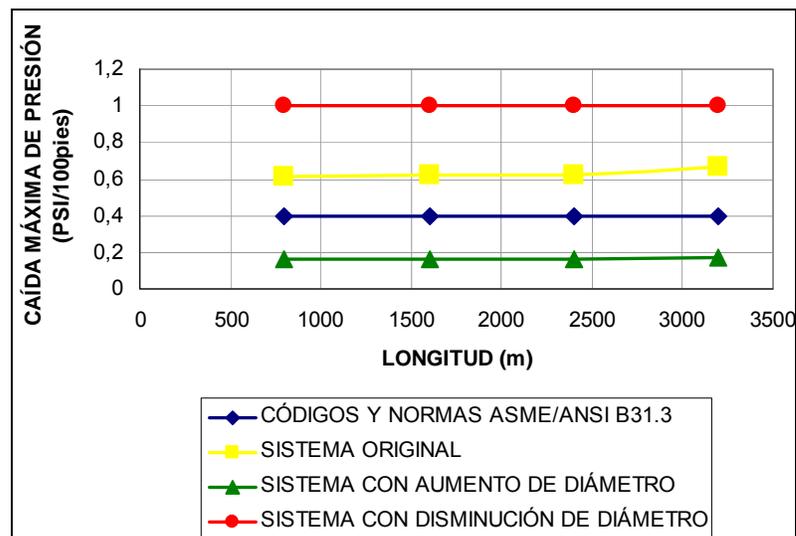
**Tabla 4.23. Variación de la máxima caída de presión de cada uno de los casos en comparación con los Códigos y Normas ASME/ANSI B31.3**

| Línea salida DEFO-2 | Caída máxima de presión de acuerdo a la Norma (psi/100 pies) | Máxima caída de presión (Sistema Original 12") (psi/100 pies) | Máxima caída de presión (Caso 1 ↑Ø de 12" a 16") (psi/100 pies) | Máxima caída de presión (Caso 2 ↓Ø de 12" a 10") (psi/100 pies) |
|---------------------|--|---|---|---|
| L001                | 0,4  | 0,61 a 0,67   | 0,16 a 0,17   | 1   |

Para un mejor entendimiento se muestran las gráficas de velocidad erosiva y máxima caída de presión en función de la longitud (Ver Figs. 4.31 y 4.32).



**Figura 4.31. Variación de la Velocidad Erosiva (línea que transfiere los fluidos a DEPO) a lo largo de la línea en cada caso, comparado con la Norma API RP 14E.**



**Figura 4.32. Variación de la Caída de Presión (línea que transfiere los fluidos a DEPO) a lo largo de la línea en cada caso, comparado con los Códigos y Normas ASME/ANSI B31.3.**

## **4.2. SOLUCIONES A MEDIANO Y LARGO PLAZO A LA PROBLEMÁTICA DE EROSIÓN, PRODUCTO DEL ARENAMIENTO**

### **4.2.1. Muestreo y caracterización de la arena y el fluido presente en el Campo de la Unidad de Producción Dación**

Para efectos de cálculos se consideró el análisis granulométrico realizado por la empresa Champion Technology y el Laboratorio de PDVSA. Los valores correspondientes al estudio granulométrico se muestran en la Fig. 4.33, en la cual se observa la distribución del tamaño de grano de muestras tomadas a la salida del múltiple D2-RSE, en el calentador ubicado dentro de la estación principal DEPO y en el separador ubicado en la estación de descarga (DED-1) correspondiente a la Unidad de Producción Dación. Esto fue realizado con la finalidad de obtener los valores de los diámetros de las partículas de arenas que provienen de los diferentes pozos que suministran sus fluidos a esta unidad de producción, ya que es una de las variables que se necesita para el diseño del equipo desarenador. A su vez a estas muestras de sólidos se le realizaron diferentes análisis para determinar sus propiedades físicas necesarias para el estudio del equipo desarenador:

➤ Descripción del sólido.

98 % de SiO<sub>2</sub>, densidad de 2,7 kg/cm<sup>3</sup> y una concentración de 350,6 mg/L.

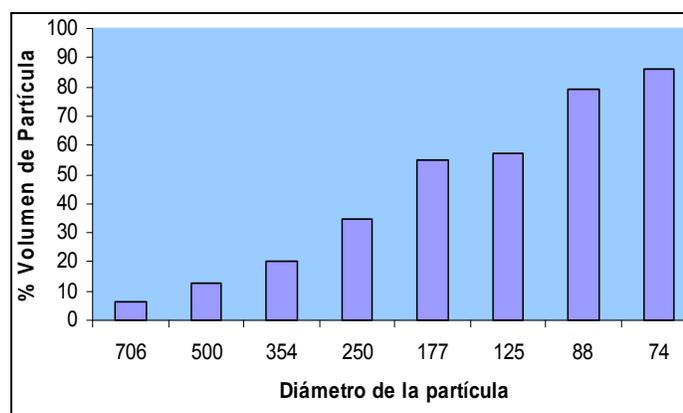
➤ Descripción del agua de formación.

Densidad de 1025 kg/cm<sup>3</sup>, Viscosidad a temperatura de operación de 1 a 100 °F cps, porcentaje total de líquido 82 %.

➤ Descripción del crudo.

19 °API, 0,9402 de gravedad específica, Viscosidad a temperatura de operación de 60 a 100 °F cps, porcentaje total de líquido 18 %.

➤ El Gas contiene 4,5 % de volumen molar de CO<sub>2</sub>.



**Figura 4.33. Distribución del tamaño de la partícula.**

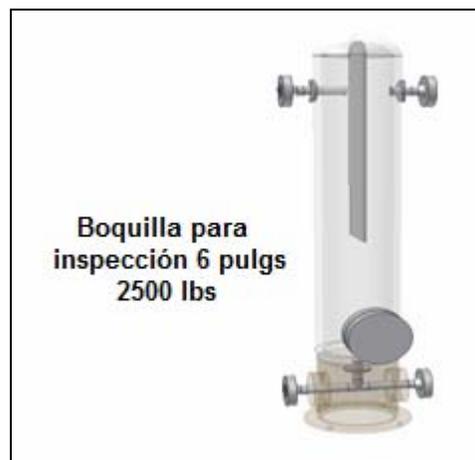
#### 4.2.2. Estudio de las diferentes tecnologías utilizadas en otros Distritos que permiten extraer la arena de superficie

En el *Distrito Morichal* se utiliza un sistema que consta de drenajes multipuntos en tanques de lavado, con la finalidad de remover los sólidos depositados en el fondo del tanque que se encuentran ligados con el agua, para luego pasar el agua a través de un proceso de decantación y ser despojada de los sedimentos (Ver Fig. 4.34). Finalmente, el agua y los sedimentos son dispuestos de forma separada. Siendo esta la mejor opción a mediano plazo para extraer la arena que sale del separador ubicado en la estación de flujo antes que las bombas succionen el fluido.



**Figura 4.34. Tecnología PDVSA – Distrito Morichal (Tanque de lavado).**

En el *Distrito Norte* se realizó un estudio el cual permitió la separación de las partículas sólidas del fluido por placa impacto (Ver Fig. 4.35), lo cual impulsó a la realización de un equipo como el ciclón que opera por la ley centrifuga.



**Figura 4.35. Tecnología PDVSA – Distrito Norte, separación por placa impacto.**

En la Tabla 4.24 se muestra el diseño de la hoja de cálculo donde se determinó las dimensiones requeridas para un equipo desarenador que permita la separación

sólido-líquido (arena-crudo) y que cumpla con los parámetros para los ciclones de entrada tangencial, como son los ciclones de alta eficiencia (Stairmand, Swift, Echeverri), alta capacidad (Stairmand, Swift), convencionales (Lapple, Swift, Peterson-Whitby, Zenz) y para los ciclones de entrada tangencial.

En el **APÉNDICE J**, se muestra los diferentes cálculos para los tipos de ciclones de alta eficiencia, alta capacidad y convencionales mencionados anteriormente. En los cálculos realizados se observó que la dimensión del ciclón diseñado fue muy grande (4,824 m) no siendo esto lo requerido por la empresa. Estas dimensiones pueden ser adecuadas a 0,804 m al dividir el flujo en 6 partes iguales (usar una batería de ciclones).

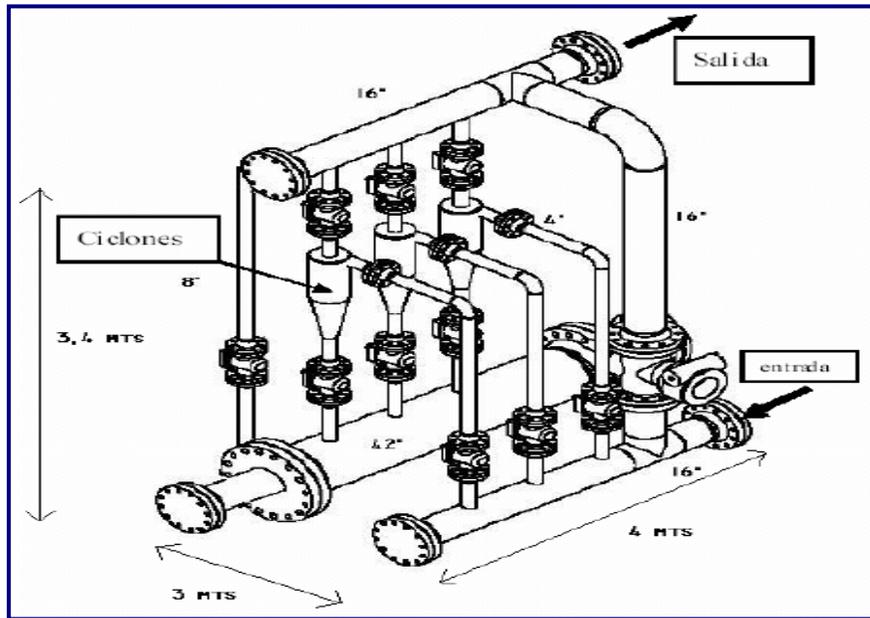
La mesa de trabajo propuso entregarle los datos adquiridos anteriormente a las empresas COTRAP y EQUIPETROL, para el diseño de hidrociclones con separación trifásica (sólido, líquido, gas). Las mismas propusieron tecnologías mas avanzadas en comparación al estudio realizado de ciclones de separación bifásicos (Ver Figs. 4.36 y 4.37).

**Tabla 4.24. Hoja de cálculo de un ciclón de alta eficiencia Tipo Stairmand.**

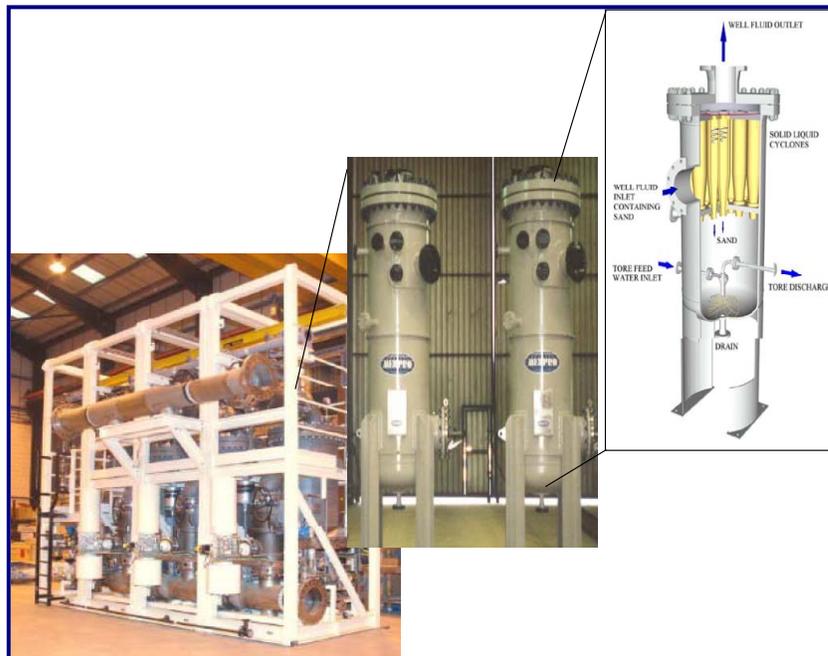
| Datos de Entrada         |             |           |                      |
|--------------------------|-------------|-----------|----------------------|
|                          |             |           | UNIDADES             |
| Caudal                   | Q           | 3,2       | m <sup>3</sup> / seg |
| Velocidad de entrada     | Vi          | 22        | m / seg              |
| Temperatura del Gas      | T           | 450       | °C                   |
| Viscosidad del Gas       | $\mu$       | 0,0000357 | Kg / m*seg           |
| Diametro de la partícula | Dpi         | 7,50E-06  | m                    |
| Densidad de la partícula | $\rho$ part | 1500      | Kg / m <sup>3</sup>  |
| Gravedad                 | g           | 9,8       | m / seg <sup>2</sup> |
| Densidad del Gas         | $\rho$ gas  | 0,411     | Kg / m <sup>3</sup>  |

| Resultados                         |                     |
|------------------------------------|---------------------|
| Diametro del ciclón                | <b>Dc = 1,206 m</b> |
| Altura a la entrada del ciclón     | <b>a = 0,603 m</b>  |
| Ancho a la entrada del ciclón      | <b>b = 0,241 m</b>  |
| Altura a la salida de ciclón       | <b>s = 0,603 m</b>  |
| Diametro de salida del ciclón      | <b>Ds = 0,603 m</b> |
| Altura parte cilíndrica del ciclón | <b>h = 1,809 m</b>  |
| Altura total del ciclón            | <b>H = 4,824 m</b>  |
| Altura parte conica de ciclón      | <b>z = 3,015 m</b>  |
| Diametro de salida del polvo       | <b>B = 0,452 m</b>  |



**Figura 4.36. Tecnología EQUIPETROL.**



**Figura 4.37. Tecnología COTRAP.**

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- Al considerar todos los análisis de sensibilidad realizados con el simulador PIPEPHASE 8.1 al sistema original, se puede decir que las velocidades erosivas no son las causantes principales de que las líneas L002, L003, L004, L005 y L006 sufran de agrietamientos (cada seis meses aproximadamente) ya que éstas no sobrepasan los valores de la Norma API RP 14E, pero en cuanto a caída de presión se refiere resultó que no cumple con los códigos y normas establecidos por la empresa.
- El primer estudio hidráulico referido al CASO 2 (Aumento de los diámetros de las líneas L002, L003, L004, L005 y L007 excepto las líneas L001 y L006) indicó ser apropiado para el mejor funcionamiento del sistema de recolección de flujo.
- En el segundo estudio hidráulico referido al CASO 2 con lazos (Aumento de los diámetros y colocación de lazos en las líneas L002, L004, L005 y L007) mostró que también es adecuado para el funcionamiento del sistema, ya que cumple con los códigos y normas establecidas por la empresa.
- Por costos, economía y disponibilidad en almacén de la mayoría de las tuberías el CASO 2 con lazos es el más apropiado para la empresa.

- La evaluación hidráulica de la línea de 0,406 m (16") (salida del múltiple D2-RS-E) reveló velocidades erosivas y caídas de presión bajas, ya que no sobrepasaron lo establecido por la Norma API RP 14E y los Códigos y Normas ASME/ANSI B31.3, lo que conllevó a inferir que el mecanismo de corrosión-erosión en esta línea, está asociado a la de corrosión por deposición, combinados con defectos de soldadura y corrosión localizada (pitting).
- La línea de transferencia (salida de DEFO-2 a DEPO) de 0,3048 m (12") y 3200 m de longitud no presentó velocidades erosivas altas, pero reflejó altas caídas de presión que no cumplen con los Códigos y Normas ASME/ANSI B31.3.
- El estudio hidráulico de la línea de transferencia indicó que un aumento del diámetro (12" a 16") de esta línea permitió disminuir las altas caídas de presión a valores del orden de 0,16 – 0,17 psi/100pies (Cumpliendo con los códigos y normas ASME/ANSI B31.3).
- En el estudio a mediano y largo plazo, se determinó que el ciclón bifásico no cumple con los requerimientos de la empresa, ya que sus dimensiones en cualquiera de sus presentaciones son muy grandes. La propuesta a mediano plazo es la colocación de un tanque de lavado como en el Distrito Morichal, que utiliza un sistema que consta de drenajes multipuntos, con la finalidad de remover los sólidos depositados en el fondo del tanque que se encuentran ligados con el agua, para luego pasar el agua a través de un proceso de decantación y ser despojada de los sedimentos.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- La Tecnología utilizada en el tanque 96007 de la EPM1 Morichal puede ser aplicado en tanques de lavado o cualquier tanque que opere con una interfase agua-petróleo, sin embargo requiere de un sistema de decantación y capacidad de manejar agua de producción y sólidos petrolizados en sitio.
- Para mejorar la instalación de las líneas L002 y L004 que salen del múltiple D2-LE-A y B de 0,3048 m (12”) y 550 m de longitud, se recomienda distribuir el flujo en las líneas de forma equitativa con el fin de reducir las velocidades erosivas y las caídas de presión del sistema.
- Instalar un tanque en la salida del separador ubicado en DEFO-2, para evitar la acumulación de arena y su efecto erosivo en la línea de transferencia de DEFO-2 a DEPO.
- Realizar un estudio mas avanzado de un ciclón trifásico, que permita que el caudal de entrada se ramifique en partes iguales y pasen a través de una batería de ciclones en paralelo para un mejor funcionamiento del sistema.
- Realizar un estudio de Geomecánica (mecánica de rocas) que abarque como mínimo uno de los pozos que se encuentran en el área, para determinar los diferentes factores o propiedades de los esfuerzos que actúan sobre las formaciones y con esto se busque la mejor forma de perforar los mismos, además del tratamiento que se le debe dar al pozo para mejorar la producción (métodos de recuperación secundaria).
- Monitorear la arena en las líneas de flujo por medio de probetas o por la tecnología de detección acústica pasiva.

- Estudiar la manera de eliminar o minimizar la cantidad de arena que fluye por las líneas de flujo, ya sea a nivel de pozo colocando empaques de grava en aquellos pozos que no lo contengan, o a nivel de superficie implantando tanques que permitan la decantación de las partículas como solución a mediano plazo y la colocación de algún sistema desarenador (Hidro ciclones) como una solución a largo plazo.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Braeckman, E. **Estudio de factibilidad de sistemas desarenadores en la estación de flujo (NMEF-7), ubicada al norte del estado Monagas (1999).**
- [2] Granulometría Wikipedia Disponible en la página web: [http:// es. Wikipedia.org /wiki/Granulom%C3%A9trica](http://es.Wikipedia.org/wiki/Granulom%C3%A9trica)
- [3] Intevep. **Manejo y disposición de arena.** Curso de adiestramiento, Versión 2, (2007).
- [4] Perry, R y Green, D. **Chemical Engineers Handbook.**V Edición, Editorial McGarw-Hill, México (1992).
- [5] PDVSA, **Manual de diseño de procesos. Separación Física. Principios Básicos.** Junio (1995).
- [6] Palacios, C. **Diagnóstico y Control de corrosión/erosión para el área Norte de Monagas.** Documento Técnico (1993).
- [7] Ciclones Mailxmail Disponible en la página web: <http://www.mailxmail.com/curso/vida/ciclones>
- [8] Corredor, L. Produotec. **Análisis de falla de línea de transferencia de 12” DEFO-/DEPO.** PDVSA, Campo DACIÓN, Venezuela. Referencia PP-018-07. Abril (2006).

- [9] EGEP Consultores, S.A. **Estudio del Arenamiento de pozos en la zona norte de Monagas, Fase I. (1993).**
- [10] Intevep. **Detectores comerciales y otras alternativas para la detección de arena en líneas de producción de crudo/gas.** Documento Técnico, (1997).
- [11] Rietma, K. **Performance and design of hydrocyclones, parts I, II, III and IV. (1961).**
- [12] Agar, G. y Herbst. **The Effect of Fluid Viscosity on Cyclone Classification. (1966).**
- [13] Arterburn, R.A. **The Sizing of Hydrocyclones,** Krebs Engineers, Menlo Park, CA. (1976).
- [14] Bohnet M. y Mueller M. **Pressure Drop and Grade Efficiency of a Newly Developed Hydrocyclone for the Separation of Two Different Solids from a Liquid Flow.** Lyon, France, (1998).
- [15] Nageswararao, K., Wiseman, D. M. y Napier - Munn, T. J. Intevep. **Two empirical hydrocyclone models revisited. (2000).**
- [16] Kawatra, S.K., Bakshi, A.K. y Rusesky, M.T. Intevep. **Effect of viscosity on the cut (d50) size of hydrocyclone classifiers. (2001).**
- [17] Chen, W.U, Zydek, N y Parma, F.R. Intevep. **Evaluation of hydrocyclone models for practical applications. (2001).**

## **APÉNDICES**

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

|                  |  |
|------------------|--|
| <b>TÍTULO</b>    | <b>EVALUACIÓN HIDRÁULICA DE LAS LÍNEAS DE EXTRACCIÓN DE CRUDO QUE ALIMENTA Y TRANSFIEREN LOS FLUIDOS DE LA ESTACIÓN DE FLUJO DEFO-2, DE LA U.P. DACIÓN, PDVSA-SAN TOME, EDO-ANZOÁTEGUI</b> |
| <b>SUBTÍTULO</b> |  |

AUTOR (ES):

| <b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>              | <b>CÓDIGO CULAC / E MAIL</b>   |
|---|--|
| <b>Bejarano Nuñez, Claudell Ernesto</b> | <b>CVLAC: 14.307.135</b><br><b>E MAIL: bejarano.claudell@gmail.com</b> |

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

\_\_\_Hidráulica,Fluidos,Líneas,PIPEPHASE,Ciclón,Tuberías,Normas\_\_\_

---

---

---

---

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

| <b>ÁREA</b>                            | <b>SUBÁREA</b>             |
|--|----------------------------|
| <u>Ingeniería y Ciencias Aplicadas</u> | <u>Ingeniería Mecánica</u> |
|  |                            |
|  |                            |

RESUMEN (ABSTRACT):

En la actualidad se presentan problemas mecánicos de erosión por la presencia de arena en las tuberías que alimentan la estación de flujo DEFO-2 y la línea de transferencia que transporta los fluidos (crudo-gas-agua) de DEFO-2 hacia la estación principal DEPO, en el Distrito San Tomé. El separador horizontal que se encuentra en DEFO-2, no realiza su función de separar la mezcla, solo la desgasifica y por no poseer un sistema que permita la extracción de arena, lleva a las bombas de salida a succionar todo el líquido y cierta cantidad de arena, esta cantidad de arena contenida en el líquido erosiona de manera agresiva la línea de transferencia, ocasionando su ruptura en cortos períodos de tiempo, provocando derrames de fluidos (crudo y agua), pérdidas en la producción de la estación DEPO y la generación de mayores gastos para el reemplazo de la línea.

El estudio se realizó utilizando el simulador PIPEPHASE 8.1, la Norma API RP14E y los Códigos y Normas ASME/ANSIB31.3 para proponer soluciones a corto, mediano y largo plazo a la problemática del avenamiento presente a la U.P Dación.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

| APELLIDOS Y NOMBRES          | ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL |                   |           |             |             |
|------------------------------|-----------------------------|-------------------|-----------|-------------|-------------|
| <b>Prof. Johnny Martínez</b> | <b>ROL</b>                  | <b>CA</b>         | <b>AS</b> | <b>TU X</b> | <b>JU</b>   |
|                              | <b>CVLAC:</b>               | <b>8.340.871</b>  |           |             |             |
|                              | <b>E_MAIL</b>               |                   |           |             |             |
|                              | <b>E_MAIL</b>               |                   |           |             |             |
| <b>Prof. Lino Camargo</b>    | <b>ROL</b>                  | <b>CA</b>         | <b>AS</b> | <b>TU</b>   | <b>JU X</b> |
|                              | <b>CVLAC:</b>               | <b>11.496.426</b> |           |             |             |
|                              | <b>E_MAIL</b>               |                   |           |             |             |
|                              | <b>E_MAIL</b>               |                   |           |             |             |
| <b>Prof. Melchor Ledezma</b> | <b>ROL</b>                  | <b>CA</b>         | <b>AS</b> | <b>TU</b>   | <b>JU X</b> |
|                              | <b>CVLAC:</b>               | <b>11.175.872</b> |           |             |             |
|                              | <b>E_MAIL</b>               |                   |           |             |             |
|                              | <b>E_MAIL</b>               |                   |           |             |             |

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

|             |            |            |
|-------------|------------|------------|
| <b>2009</b> | <b>11</b>  | <b>02</b>  |
| <b>AÑO</b>  | <b>MES</b> | <b>DÍA</b> |

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

| NOMBRE DE ARCHIVO        | TIPO MIME          |
|--------------------------|--------------------|
| EVALUACIÓNHIDRÁULICA.doc | Application/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:** \_\_\_\_\_ (OPCIONAL)

**TEMPORAL:** \_\_\_\_\_ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Mecánico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Mecánica

---

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente / Núcleo de Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

**DE ACUERDO AL ARTÍCULO 44 DEL REGLAMENTO DEL TRABAJO DE GRADO: “LOS TRABAJOS DE GRADO SON DE EXCLUSIVA PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE Y SÓLO PODRÁN SER UTILIZADOS A OTROS FINES CON EL CONSENTIMIENTO DEL CONSEJO DE NÚCLEO RESPECTIVO, QUIEN LO PARTICIPARÁ AL CONSEJO UNIVERSITARIO”**

**Claudell Ernesto Bejarano Nuñez**

**C.I 14.307.135**

**AUTOR**

**AUTOR**

**AUTOR**

**Prof. Johnny Martínez**

**TUTOR**

**Prof. Lino Camargo**

**JURADO**

**Prof. Melchor Ledezma**

**JURADO**

POR LA SUBCOMISION DE TESIS