

**OPTIMIZACIÓN DE LA CAPACIDAD VOLUMÉTRICA DEL ACTUAL SISTEMA DE
VERTIMIENTO EN CAMPO RUBIALES INCREMENTANDOLA A TRESCIENTOS MIL
BARRILES DE AGUA POR DÍA.**

JAIRO EDUARDO ARÉVALO VARGAS

JUAN JOSÉ GAITÁN ROJAS

Proyecto integral de grado para optar al título de:

INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director:

Héctor Jaime Agudelo Rincón

Ingeniero de Petróleos

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE ENERGÍAS

BOGOTÁ D.C

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre
Firma del Director

Nombre
Firma del Presiente Jurado

Nombre
Firma del Presiente Jurado

Nombre
Firma del Presiente Jurado

Bogotá D.C. 12 de Julio de 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. Julio César Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería de Petróleos

Ing. Juan Carlos Rodríguez Esparza

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
1 . MARCO TEÓRICO.	15
1.1 Vertimiento de aguas de producción	15
1.2 Diseño de tuberías	15
1.2.1 Consideraciones de diseño	16
1.2.2 Presión de máxima de operación	16
1.2.3 Presión de diseño	17
1.2.4 Temperatura de diseño	17
1.3 Capacidad de tubería	17
1.4 Problemas en sistema de vertimiento	18
1.4.1 Obstrucciones de tubería	18
1.4.2 Corrosión de tubería	18
1.4.3 Fallo en equipos de bombeo	18
1.4.4 Pérdida de integridad de válvulas de control	19
1.5 Limpieza Química de Tuberías	20
1.5.1 Generalidades	20
1.5.2 Limpieza química de tuberías de vertimiento (Desengrasado)	21
1.5.3 Criterios de selección del químico	22
1.6 Limpieza Mecánica de Tuberías	22
1.6.1 Generalidades	22
1.6.2 Clasificación tipo de cerdos	23
1.6.3 Criterios de selección del marrano (Pig)	25
1.6.4 Lanzamiento y Recepción de los Cerdos Raspadores	25
2 . METODOLOGÍA Y DATOS.	27
2.1 Información de Diseño	29
2.1.1 Control de Temperatura	29

2.1.2 Sistema de Aspersión	31
2.1.3 Sistema de Vertimiento	33
2.1.4 Sistema de Protección Para la Descarga del Vertimiento	36
2.2 Información operacional.	37
2.2.1 Ventanas Y Guías De Control Operativas	37
2.2.2 Controles de Proceso	38
2.2.3 Información Adicional	41
2.3 Criterios de diseño simulación caso base	44
2.4 Creación del Caso de Simulación	46
2.4.1 Creación del Modelo de Datos	46
2.4.2 Creación de la Red de Superficie	51
2.4.3 Corridas y Ajustes del Modelo de Simulación	58
2.5 Análisis de alternativas para la limpieza y remoción de obstrucciones en las líneas de vertimiento	61
2.5.1 Limpieza Química	61
2.5.2 Limpieza Mecánica	63
2.5.3 Cambio de los tramos de línea de la Bifurcación de 12” y 14”	64
2.5.4 Selección de la Alternativa de Limpieza	65
3 . RESULTADOS Y ANÁLISIS.	68
3.1 Resultados del caso de simulación	68
3.1.1 Corrida Inicial	71
3.1.2 Representación Prueba de Bombas	72
3.1.3 Ajuste a condiciones actuales	74
3.1.4 Caso de Simulación Efectividad de Limpieza	79
3.2 Consideraciones de Alternativas	81
3.2.1 Limpieza Química	81
3.2.2 Limpieza Mecánica	86
3.2.3 Cambio de Tramos de Línea de Bifurcación	90
3.2.4 Selección de Alternativa	92
3.3 Desarrollo de la alternativa seleccionada.	96

3.3.1 <i>Locación</i>	96
3.3.2 <i>Diagrama de Diseño</i>	98
3.3.3 <i>Logística</i>	100
3.3.4 <i>Consideraciones del Proceso</i>	101
3.3.5 <i>Tren de Raspadores de Limpieza</i>	104
3.3.6 <i>Trampas Receptoras</i>	106
3.3.7 <i>Sistema de Recuperación de Residuos</i>	108
3.3.8 <i>Procedimiento Preliminar Operación de Limpieza.</i>	109
3.3.9 <i>Análisis Financiero.</i>	114
4 . <i>CONCLUSIONES.</i>	119
<i>BIBLIOGRAFÍA.</i>	122
<i>ANEXO 1.</i>	123

LISTADO DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Tabla de Tipos de Limpieza Química Comunes	20
Figura 2. Limpieza Química de Tubería	21
Figura 3. Diagrama de funcionamiento del cerdo	23
Figura 4. Tipos de Raspadores Utilitarios	24
Figura 5. Trampas lanzadoras y receptoras	26
Figura 6. Diagrama metodología para el desarrollo del trabajo	28
Figura 7. Torres de Enfriamiento	30
Figura 8. Cabezal de descarga hacia vertimiento	34
Figura 9. Diagrama de distribución del Sistema de Vertimiento	35
Figura 10. Sistema de protección para la descarga vertimiento C, D y E	36
Figura 11. Data Histórica de Vertimiento	42
Figura 12. Data Histórica de Cada Vertimiento	43
Figura 13. Diagrama Criterios de Diseño Caso de Simulación	44
Figura 14. Diagrama Creación del Caso de Simulación	46
Figura 15. Selección modelo de Fluido	47
Figura 16. Propiedades del Modelo de Fluido	48
Figura 17. Modelo de Viscosidad	48
Figura 18. Modelo de Termal	49
Figura 19. Configuraciones de la simulación	50
Figura 20. Creación Bomba en Catálogo	51
Figura 21. Datos de la Bomba	52
Figura 22. Datos de Rendimiento de la Bomba	53
Figura 23. Pestaña de Herramientas para construir la Red	53
Figura 24. Pestaña de edición Sources	55
Figura 25. Pestaña de Unidades de Bombeo	55
Figura 26. Pestaña de Herramientas para construir la Red	56
Figura 27. Maqueta a escala Planta A	57
Figura 28. Configuración de Sinks	58

Figura 29. Diagrama de flujo Metodología Corridas y Ajustes del Modelo de Simulación	60
Figura 30. Parámetros Físico-Químicos Agua de Vertimiento	62
Figura 31. Parámetros Físico-Químicos Licencia Ambiental	62
Figura 32. Limpieza Mecánica Hidráulica de Tubería	63
Figura 33. Tramo de línea de la Bifurcación	64
Figura 34. Árbol de decisión de las alternativas	66
Figura 35. Rango de Evaluación de Alternativas	66
Figura 36. Red de Superficie construida	69
Figura 37. Iteraciones Red de Superficie construida	69
Figura 38. Descripción Casos de Simulación Construidos	70
Figura 39. Resultados Corrida Inicial	71
Figura 40. Resultados a las condiciones de prueba de las bombas	73
Figura 41. Factores de Fricción de fase simple “C” comunes	75
Figura 42. Ajuste configuraciones Factor “C”	76
Figura 43. Resultados ajuste caso condiciones actuales	76
Figura 44. Comparación Resultados Obtenidos	77
Figura 45. Perfiles de Presión Casos de Simulación	78
Figura 46. Tabla de Resultados, Simulación Efectividad.	80
Figura 47. Pig de limpieza recomendado	86
Figura 48. Lanzador portable de raspador	88
Figura 49. Equipo de Pig Tracking	89
Figura 50. Propiedades Mecánicas y Químicas API-5L	91
Figura 51. Resultado Rango de Evaluación de Alternativas	92
Figura 52. Resultado Evaluación de Alternativas	95
Figura 53. Punto de Lanzamiento de los Raspadores	96
Figura 54. Punto de Recepción de los Raspadores	97
Figura 55. Recorrido del Raspador	98
Figura 56. Diagrama de Diseño Elaborado	99
Figura 57. Presiones Recomendadas para Operaciones de Limpieza	102
Figura 58. Velocidad de Operación Pig	103

Figura 59. Tipos de Polly Pigs de Media Densidad	104
Figura 60. Trampas Removibles Temporales	106
Figura 61. Plano Trampa Receptora	107
Figura 62. Configuración Sistema Propuesto Manejo de Fluidos	108
Figura 63. Diagrama Procedimiento de Lanzamiento	111
Figura 64. Diagrama Procedimiento de Recepción	113

LISTADO DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Datos de diseño Torres de Enfriamiento	29
Tabla 2. Datos de diseño boquillas Sistema de Aspersión	31
Tabla 3. Datos de diseño Bombas Sistema de Aspersión	32
Tabla 4. Datos de diseño Piscina de Aspersión	32
Tabla 5. Datos de diseño Bombas Sistema de Vertimiento	33
Tabla 6. Coordenadas de los Puntos de Vertimiento	35
Tabla 7. Ventanas y Guías de Control Operativas	37
Tabla 8. Controles de Flujo	38
Tabla 9. Controles de Nivel	39
Tabla 10. Controles de Presión	39
Tabla 11. Controles de Temperatura	40
Tabla 12. Elementos de la red de superficie	54
Tabla 13. Tabla de Criterios de Selección	67
Tabla 14. Resumen pruebas de unidades de Bombeo	72
Tabla 15. Comparación de Presiones Prueba vs Simulación	73
Tabla 16. Composición de soluciones alcalinas	81
Tabla 17. Composición de soluciones alcalinas	82
Tabla 18. Volúmenes de Llenado	84
Tabla 19. Requerimientos de la Limpieza Química	85
Tabla 20. Requerimientos de la Limpieza Mecánica	89
Tabla 21. Requerimientos de la Reconstrucción de la Bifurcación	91
Tabla 22. Raspadores a Correr	105
Tabla 23. Requerimientos de la Limpieza Mecánica	114
Tabla 24. Información de Producción acorde a la Optimización	115
Tabla 25. Resultados de Evaluación Financiera	116
Tabla 26. Evaluación Financiera sin Diferida	118

RESUMEN

La pérdida de capacidad volumétrica en el sistema de vertimiento representa el desaprovechamiento en la capacidad de tratamiento de fluido lo cual se traduce en pérdida de producción. En este proyecto se realizó un análisis hidráulico, a partir de la información de diseño y operativa del sistema de vertimiento de Campo Rubiales, mediante la construcción de 3 distintos casos de simulación (Caso Ideal, Caso Representación Prueba de Bombas y Caso Actual). A partir de la comparación de las propiedades de diseño como el factor "C" entre los casos, los perfiles de presión obtenidos y la comparación de presión y caudal en el cabezal de distribución hacia los ramales de vertimiento C, D y E, se obtuvo como resultado que la diferencia de lecturas de presión en este punto entre el Caso Representación Prueba de Bombas y los verdaderos datos de la prueba era de 28 Psig en un sistema con un factor "C" común para tuberías en buen estado. Del mismo modo el ajuste del factor "C" para la representación del caso actual donde se redujo en el tramo de la bifurcación y otros puntos de la red para representar los caudales que se están manejando en la actualidad. Lo anterior permitió establecer la existencia de pérdidas de presión adicionales en el sistema, probablemente asociado a obstrucciones y reducción de diámetro efectivo en la tubería. A demás a partir de este caso que representa la actualidad, se sensibilizó la variable de control del modelo de flujo "C", hasta conseguir un porcentaje de efectividad en base a el cambio de esta variable hasta cuando se cumpliera con los requerimientos de caudal de 300KBWPD, garantizando la optimización del sistema de vertimiento.

En base a la evaluación de las alternativas propuestas mediante la matriz de selección planteada en la metodología, se obtuvo que la limpieza mecánica es la mejor opción para desarrollar con el objetivo de la optimización del sistema de vertimiento. Esta reduce el riesgo asociado a la actividad en criterios como eficiencia de remoción, integridad de equipos, logística entre otros criterios. A demás, se obtuvo una evaluación financiera positiva en dos escenarios, uno con un horizonte de proyecto a 2 años y otro escenario con un periodo de duración de un mes, en base a los tiempos de implementación.

Palabras clave: Sistema de Vertimiento, Limpieza Mecánica de Tuberías, Producción, Limpieza Química de Tuberías, Caudal, Pérdidas de Presión.

INTRODUCCIÓN

El Campo Rubiales cuenta con una producción de agua de alrededor de 3.770 MBWPD (millones de barriles de agua por día), con un corte de agua del fluido del 98% produciendo aproximadamente 115 KBOPD (miles de barriles de petróleo por día). Acorde con la gran cantidad de agua producida el campo cuenta con dos metodologías para la disposición de agua; la re inyección para sostenimiento de presión representando aproximadamente el 90% de la disposición, y el 10 % restante es dispuesto a través del sistema de vertimiento el cual cuenta con una capacidad de diseño de 300 KBWPD dividido en 5 puntos de vertimiento que representan 60 KBWPD. En la PLANTA-A de Campo Rubiales se lleva a cabo el tratamiento de agua para vertimiento, que tiene como fin la desestabilización de la emulsión inversa (fase dispersa crudo en la fase continua agua), procesando la capacidad permitida para vertimiento y dejándose en las especificaciones fisicoquímicas establecidas por la licencia ambiental otorgada para esta actividad. Desde la reanudación del vertimiento en el año 2018, ha bajado la capacidad volumétrica de vertimiento a +/- 296.000 Bbls hasta el día de hoy, perdiéndose una capacidad de tratamiento de 4000 BWPD en el sistema de vertimiento, que de acuerdo con las características de BSW de 98%, representa una pérdida de producción de 80 BOPD. Actualmente se han identificado problemas con el caudal de los vertimientos C, D, y E los cuales no alcanzan los 60KBWPD.

El presente trabajo tiene como objetivo general, Optimizar la capacidad volumétrica a 300KBWPD del actual sistema de vertimiento de Campo Rubiales, a través de los siguientes objetivos específicos. inicialmente se va a clasificar la información disponible del análisis del caso de la reducción en la capacidad volumétrica del actual sistema de vertimiento en Campo Rubiales (4000BWPD) en tres categorías; información de diseño, operacional y adicional. Una vez organizada la información, se va elaborar el análisis hidráulico de las líneas de vertimiento de C, D y E de 12". La importancia de realizar un análisis hidráulico radica en que es una práctica que permite identificar el comportamiento de un sistema de tuberías hidráulico bajo sus condiciones operativas y de diseño, mediante el cual se pueden calcular las pérdidas de presión en el sistema para poder comparar con los registros de las variables que está experimentando el mismo, y de esta

manera identificar pérdidas de presión adicionales en el sistema que impiden que se cumpla con las capacidades volumétricas en los nodos de salida de un sistema hidráulico.

Una vez se establece la causa de la pérdida de capacidad del sistema de vertimiento este trabajo se centra en evaluar las alternativas para reestablecer la capacidad volumétrica de vertimiento de acuerdo con los criterios establecidos para el caso y finalmente se define la mejor opción. Se hace una comparación y una evaluación bajo la cual se determina la mejor alternativa entre las propuestas, para finalmente proponer el diseño de la misma de acuerdo con los escenarios evaluados anteriormente, donde se especifican características técnicas propias de la alternativa, procedimientos operacionales y finalmente como último objetivo se va a elaborar la evaluación financiera para la respectiva propuesta de diseño desarrollada en el objetivo anterior.

En el primer capítulo del se abordan las cuestiones teóricas que sustentan el planteamiento. Se hace un breve repaso de los sistemas de vertimiento y las características de diseño de tuberías, problemáticas en sistemas de vertimiento, limpieza mecánica química y mecánica de tuberías.

En el segundo capítulo se agrupa la información disponible del sistema de vertimiento, características de diseño, variables operacionales y datos volumétricos del sistema de vertimiento. También se aborda la metodología bajo la cual se desarrolla el trabajo, tales como; criterios de diseño para los casos de simulación, procedimiento bajo el cual se deben construir los mismos en la herramienta dispuesta para dicho fin (Pipe Sim), análisis de alternativas para la reducción de pérdidas de presión en el sistema de vertimiento, y la metodología para la evaluación de alternativas y la selección de la mejor alternativa.

En el tercer capítulo se hace la interpretación de los resultados obtenidos y su respectivo análisis, refiriéndose a los resultados de las corridas de los distintos casos de simulación elaborados, el análisis de cada una de las alternativas planteadas ajustada al caso de estudio y todas sus consideraciones, la evaluación y selección de la alternativa bajo la metodología matriz de selección planteada, y finalmente el desarrollo de la alternativa, donde se especifican las características conceptuales, técnicas y operacionales de la propuesta para la optimización del sistema de vertimiento, además del análisis financiero preliminar para la evaluación del proyecto.

1 . MARCO TEÓRICO.

1.1 Vertimiento de aguas de producción

Un vertimiento se puede definir como la descarga final a cuerpos de agua de sustancias o distintos compuestos que están contenidos en un medio líquido. En la industria del petróleo fueron utilizados los vertimientos puntuales para la disposición de agua de producción. En Colombia toda actividad asociada con el vertimiento de aguas residuales en cuerpos de agua, está regulada por Resolución 0631 de 2015 reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 y actualiza el Decreto 1594 de 1984, dicha resolución es de obligatorio cumplimiento para toda actividad industrial o económica que al ser desarrollada genere residuos líquidos. El control se realiza a partir de la medición de la concentración de las sustancias descargadas a los cuerpos de agua y que afectan la calidad del agua, bajo el Decreto 1594 de 1984. En campo Rubiales la disposición del agua es fundamental para el éxito de la operación, en el campo se dispone el agua de dos formas, inyección a la formación o vertimiento al caño. El vertimiento trata de una disposición controlada de un residuo líquido procedente de la actividad industrial de explotación del campo, por tuberías distribuidas en 5 puntos autorizados para disponer 300.000 barriles de agua por día.

1.2 Diseño de tuberías

El diseño de un sistema de tuberías consiste en realizar la correcta selección de sus características es por eso que se tendrán en cuenta las normas internacionales estipuladas como la ASME B31.3 que establece las reglas para tuberías de proceso a presión, específicamente a relacionada con tuberías de procesamiento, API 5L y la ASTM A789 que es una especificación estándar creada para tuberías de acero inoxidable tipo ferrítico o austenítico sin costuras y soldados de servicios generales. Estos materiales son los más usados en la industria de hidrocarburos, sin embargo, se pretende usar dichas normas como una guía de la mano con las buenas prácticas de ingeniería aplicadas, debido a que no son un manual de diseño, ni pretende sustituir la experticia de los ingenieros.

1.2.1 Consideraciones de diseño

- **Presión Interna:** “La presión interna del fluido contenido es la carga más importante que debe transportar una tubería. Si la tensión generada en la pared de la tubería es demasiado grande, la tubería cederá circunferencialmente y la fluencia continua conducirá al adelgazamiento de la pared de la tubería y finalmente a la ruptura” [1].
- **Presión Externa:** “Una gran presión externa tiende a hacer que una tubería sea ovalada y eventualmente hace que colapse. Esta es una preocupación importante para las tuberías de aguas profundas, donde la carga hidrostática externa es un factor importante. Las tuberías enterradas en tierra también pueden verse afectadas por el peso de la sobrecarga de los vehículos” [1].
- **Carga de la Tubería:** Son todos los esfuerzos a los cuales se somete la tubería durante la construcción y tendido de línea, flexión extensión cargas, entre otras.
- **Estabilidad:** La estabilidad es la facultad que poseen las tuberías para permanecer en su lugar cuando están suspendidas para evitar el movimiento no controlado sobre la superficie, usualmente se controla este parámetro incrementando el espesor de la tubería, como se menciona en el libro de Surface Production Operations.
- **Tramos Libres:** En ocasiones sea en el lecho marino o en superficie la topografía del terreno hace que el tendido de tubería quede suspendido, esto debe ser considerado para evitar daños de la tubería por fatiga.
- **Esfuerzos de expansión:** “Las tensiones de expansión pueden surgir de la diferencia entre la temperatura de funcionamiento de la tubería y la temperatura de instalación. Si no se incorpora suficiente flexibilidad, por ejemplo, al proporcionar un bucle de expansión, pueden producirse pandeos” [1].

1.2.2 Presión de máxima de operación

El parámetro clave en el diseño y las operaciones de la tubería es el MAOP. Esto se define como la presión máxima en condiciones de funcionamiento de rutina. Los códigos de tubería generalmente permiten que el MAOP se establezca igual al DP.

$$\text{Presión máxima de operación} \geq 1,05 * \text{Presión de operación}$$

$$MAOP = \frac{0,125 PN}{C}$$

1.2.3 Presión de diseño

La presión de diseño se establece durante el desarrollo de la ingeniería de procesos, mientras que seleccionar el tipo específico de tubería se establece con base a las especificaciones de materiales que son necesarios en el proyecto. Es por esto que la presión de diseño debe ser fijada de forma tal que contemple las condiciones operativas permisibles, perturbaciones, arranque, parada y fluidos. La presión de diseño de cada componente en un sistema de tuberías no debe ser menor que la presión en la condición más severa de presión y temperatura (mínima o máxima) internas o externas coincidentes esperadas durante el servicio [1].

1.2.4 Temperatura de diseño

“La temperatura del metal es de interés al establecer la temperatura de diseño. Para B31.3, la temperatura de diseño no coincide con la temperatura del fluido del proceso. Además de la temperatura del fluido del proceso, el diseñador también debe considerar el enfriamiento ambiental, el calentamiento ambiental, la radiación solar y la temperatura máxima de rastreo de calor” [1].

1.3 Capacidad de tubería

Se trata de la capacidad máxima de transporte de fluidos prevista para el sistema de vertimiento, basado en las propiedades fisicoquímicas que se manejan que afectan la fluidez del mismo y las especificaciones operacionales como presiones y temperaturas. En este caso tenemos unas variaciones en los diámetros saliendo en 14in, seguidamente amplía a 16in y posteriormente se bifurca en dos líneas una de 14in y una de 12in, donde recorre 2km aproximadamente hasta que se divide finalmente en tres líneas de 12in. Esta capacidad solo varia si se modifica la infraestructura del tendido de líneas.

1.4 Problemas en sistema de vertimiento

1.4.1 Obstrucciones de tubería

Las obstrucciones en la tubería es uno de los problemas más comunes, debido a la acumulación de residuos generalmente de compuestos solidos o grasas que contiene el fluido que se está transportando por este medio, que se precipitan a lo largo del sistema y con el pasar del tiempo reducen el diámetro de flujo, ocasionando disminución en el caudal y aumento de presión en los sistemas de bombeo, es recomendable realizar pruebas de flujo, donde se evidencie el caudal deseado y limpiezas periódicas del sistema de tubería.

1.4.2 Corrosión de tubería

La corrosión consiste en la degradación causada por diferentes reacciones químicas generalmente en metales, que sufren un desgaste sistemático que puede afectar su composición. En ocasiones esta corrosión es tan alta que puede llegar a causar grietas por el adelgazamiento en las paredes del tubo y finalmente a que el metal sea descartado y reemplazado con el fin de evitar posibles incidentes o daños ambientales. En cualquier caso, es importante mantener un monitoreo periódico de la corrosión y un análisis químico del fluido.

1.4.3 Fallo en equipos de bombeo

El fallo en equipos de bombeo puede generar una pérdida total de caudal en el sistema causando interrupciones en el proceso, estas fallas se pueden catalogar en las siguientes:

1.4.3.a Fallo en sistemas de bombeo por cavitación. Es un fenómeno frecuente en los sistemas de bombeo donde se presentan cambios bruscos en la velocidad del flujo. Esto provoca erosión en los elementos que se produce como válvulas, rodetes y tuberías, lo que conlleva a problemas difíciles de solucionar, se evidencia por vibraciones o golpeteos.

1.4.3.b Fallo en sistemas de bombeo por dimensionamiento. Las bombas son el eje principal del sistema, por lo tanto, su sobredimensionamiento, genera un gasto excesivo de energía y una presión superior a la necesaria. Lo que puede someter a otros elementos a un estrés para el que no están diseñados, por otro lado, una bomba con una capacidad menor a la necesaria puede causar deficiencias en el flujo requerido debido.

1.4.3.c Fallo en sistemas de bombeo por falta de mantenimiento. Los fallos por falta de mantenimiento se evidencian principalmente en equipos mecánicos por ejemplo las bombas que no han recibido un mantenimiento adecuado generan pérdidas de eficiencia y paradas imprevistas lo que genera una pérdida total del flujo.

1.4.4 Pérdida de integridad de válvulas de control

La integridad mecánica consiste en el proceso de garantizar que todos los equipos sean fabricados con materiales adecuados y correctamente instalados. En todos los equipos es fundamental para mitigar los fallos de la operación y posibles daños ambientales, es por eso que se deben realizar inspecciones del correcto funcionamiento de las válvulas de control de los puntos de vertimiento ya que actúan como barrera primaria en el momento de una eventualidad, la correcta instalación y mantenimiento de las mismas conllevan al éxito de la operación en general.

1.5 Limpieza Química de Tuberías

Las limpiezas químicas consisten en la circulación de un compuesto químico en disolución, utilizando un control de temperatura y una velocidad establecida a través de las líneas de vertimiento que se desean limpiar. Esta consiste en la eliminación de los depósitos de grasas y aceites que se pueden presentar a lo largo de la tubería y por la cual no se logra el caudal de vertimiento requerido.

1.5.1 Generalidades

Los métodos de limpieza química tienen una ventaja la cual es que el equipo y los conductos no tienen que ser desmantelados o removidos de la línea un área especial para realizar el trabajo. Los métodos químicos pueden limpiar áreas que son difíciles de limpiar por otros métodos además muchos químicos son nocivos y se pueden presentar problemas de disposición después de su uso.

Figura 1.

Tabla de Tipos de Limpieza Química Comunes

TABLA 2: MÉTODOS COMUNES DE LIMPIEZA QUÍMICA	
MÉTODO DE LIMPIEZA	COMPONENTE
Cascarding	Recipientes
Chemical Slugging (golpe químico)	Tubos de intercambiadores de calor
Circulation (circulación)	Todos excepto cámaras de combustión y maquinaria rotativa
Filling and Soaking (llenado y remojo)	Intercambiadores de calor, Recipientes, Conductos
Foaming (con formación de espuma)	Recipientes, Conductos
High Velocity Flushing with Cleaning Chemicals (Flujo químico a alta velocidad)	Conductos
Solvent Brushing (cepillado con solventes)	Tubos de intercambiadores de calor y maquinaria rotativa
Inmersión en tanque	Haces de intercambiadores de calor
Limpieza fase vapor con solventes volátiles.	Recipientes, Conductos
Limpieza en fase vapor con químicos de limpieza.	Recipientes, Conductos, Superficies planas

Nota. Esta figura muestra los principales tipos de Limpiezas Químicas. Tomado de: S. Martínez. *Limpieza de Equipos de Proceso y Tuberías*. [En Línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/22989301/Limpieza_de_Equipos_de_Proceso_y_Tuberias

1.5.2 Limpieza química de tuberías de vertimiento (Desengrasado)

El ensuciamiento es un tipo de material insoluble que contamina, o se deposita en equipos de proceso y tuberías y produce efectos indeseables. El ensuciamiento disminuye el flujo incrementando la caída de presión, disminuye la transferencia de calor por la formación de barreras térmicas o incrustaciones, disminuye la vida de servicio incrementando las temperaturas del metal o causando corrosión en depósitos y erosión-corrosión, crea problemas operativos en unidades de fases posteriores, y crea contaminantes indeseables o inesperados. En resumen, el ensuciamiento incrementa los costos de operación por el incremento de servicios, paros técnicos, y costos de mantenimiento, y como un resultado, incrementa el costo del producto y usualmente empobrece la calidad del producto. [2]

Antes de decidirse por un método de limpieza, cualquier suciedad encontrada en las tuberías debe ser caracterizada en términos de integridad física, cantidad, y espesor. Se pueden determinar dichas características mediante la composición del agua de vertimiento del campo. Una vez se caracteriza el agua se aplica lo siguiente; “si su composición es inferior al 30% de hidrocarburos probablemente puede ser removida por una limpieza química” [2]

Figura 2.

Limpieza Química de Tubería



Nota. Esta figura muestra el sistema de almacenamiento para Limpiezas Químicas. Tomado de: Fluorine Chemicals “De sodio, Lauril éter sulfato 70% 3eo” [En línea]. <http://pt.chinachemicalsfactory.com/detergent-chemical/sodium-lauryl-ether-sulphate-70-3eo.html> [Acceso: Abril, 2021].

1.5.3 Criterios de selección del químico

- Características de la línea como diseño, instrumentación y materiales.
- El contenido de la línea que se limpia con el fin de seleccionar el mejor producto de limpieza y procedimiento correspondiente.
- Naturaleza de los sedimentos precipitados.
- Procedimiento por realizar para establecer eficiencia y seguridad del proceso.
- Tiempo requerido para reducir diferidas, garantizando el mejor producto o solución para dar tratamiento a las condiciones dentro de la tubería.

1.6 Limpieza Mecánica de Tuberías

Es la actividad que tiene como fin la remoción y desplazamiento de elementos sólidos situados en la superficie interna de una tubería. Para estas actividades son corridos distintos tipos de cerdos raspadores que tienen como fin sacar todo tipo de residuo que se encuentra dentro de la tubería.

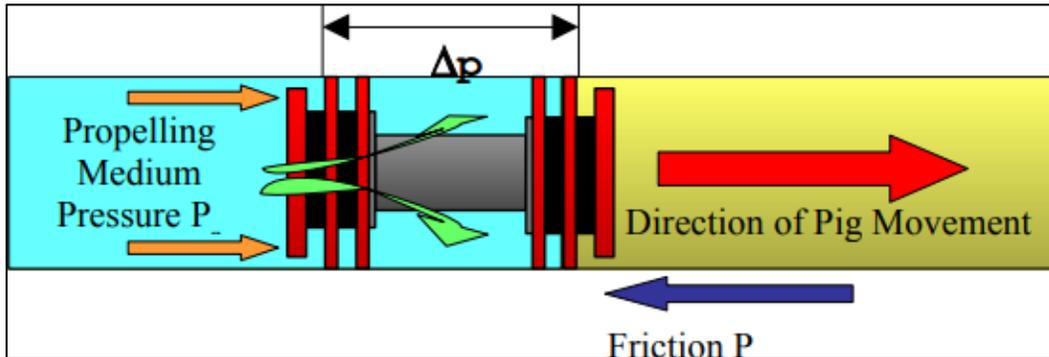
1.6.1 Generalidades

En el contexto de las tuberías el pigging se refiere a la práctica de utilizar dispositivos conocidos como “Cerdos” para realizar distintos trabajos de mantenimiento, esto se hace sin detener el flujo [1]. El cerdo es insertado en la tubería y viaja libremente a través de ella, impulsado por el flujo de la línea donde se está realizando la tarea en específico. El procedimiento de mantenimiento general consiste en tres etapas:

- 1. Bache de Inhibición:** Se requiere de un bache de inhibición que garantice que los sólidos depositados en las paredes de la tubería se humedezcan y debiliten para una limpieza eficaz.
- 2. Inspección previa a la Limpieza:** Es recomendable contar con herramientas de inspección MFL que permitan identificar la integridad de la tubería, y la magnitud de material que debe ser removido de las paredes internas de la tubería, de esta manera se consigue, identificar los requerimientos operacionales y los equipos a utilizar para la operación de limpieza. [1]

Figura 3.

Diagrama de funcionamiento del cerdo



Nota. Esta figura muestra el funcionamiento del cerdo a través de la tubería. Tomado de: Gard "Clearing of shore pipelines following cargo operations at terminals" Loss Prevention Circular No. 08-11, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://andiniputridl.wordpress.com/2016/02/04/mekanisme-kerja-pigging/>. [Acceso: Abril, 2021].

Los cerdos están diseñados para que los elementos de sellado proporcionen un diferencial de presión con la pared de la tubería. Una vez insertados en una línea, los cerdos pasan a través de la línea aplicando presión en la dirección del movimiento requerido. Este diferencial de presión generado resulta en un movimiento en la dirección de la caída de presión. En el caso de estudio las líneas son operativas, por lo tanto, esta presión es aplicada junto con el agua de vertimiento en la línea.

1.6.2 Clasificación tipo de cerdos

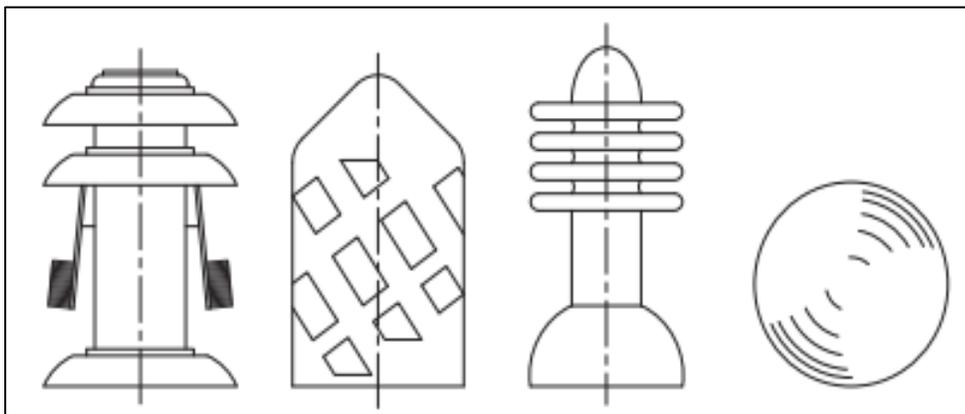
Los cerdos raspadores son clasificados en dos grandes categorías de Utilidad e Instrumentados, la primera categoría es la del interés para el caso de estudio, la cual se subdivide en 2 categorías, cerdos de limpieza y cerdos de sellado, estos últimos son los utilizados para la corrida de baches de química y/o desplazamiento de fluidos.

Los tipos de cerdos de interés para el presente proyecto son los cerdos de limpieza o cerdos raspadores. Estos se clasifican en las siguientes categorías:

- **Cerdos de Mandril:** Los cerdos de mandril se ensamblan a partir de una serie de componentes y para los que hay piezas de repuesto disponibles, el cuerpo de este tipo de marranos es un tubo el cual se puede configurar según el material depositado en las paredes internas de la tubería a limpiar. Están disponibles en la mayoría de los tamaños de línea.
- **Cerdos de Espuma:** Los cerdos de espuma se moldean a partir de espuma de poliuretano con varias configuraciones de tiras sólidas de poliuretano y / o cerdas de alambre, tachuelas, etc., unidas permanentemente a ellas. Están disponibles en la mayoría de los tamaños de línea, y generalmente son utilizados para hacer pigging en líneas que pueden presentar problemas inesperados.
- **Cerdos de Fundición Sólida:** Los cerdos de fundición sólida se moldean en una sola pieza, generalmente de poliuretano. Normalmente solo están disponibles en tamaños más pequeños.
- **Cerdos de Esfera:** Las esferas normalmente se llenan de agua / glicol. Estos cerdos se pueden inflar al diámetro óptimo, lo cual permite que viajen a través de grandes curvas.

Figura 4.

Tipos de Raspadores Utilitarios



Nota. Esta figura muestra los tipos de cerdos raspadores utilitarios. Tomado de: M. Stewart *Surface Production Operations, Pipe Line Design*. 225 Wyman Street, Waltham, MA 02451, USA Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier.

1.6.3 Criterios de selección del marrano (Pig)

La selección del cerdo raspador debe hacerse de acuerdo con el propósito del marraneo de la línea, comúnmente actividades de inspección, bacheo de fluidos, y/o desplazamiento y limpieza. Teniendo claro el propósito de la operación, se debe elegir el cerdo considerando distintos criterios de selección.

- Tipo, ubicación y volumen de la sustancia que se eliminará o desplazará en aplicaciones convencionales de limpieza.
- El contenido de la línea que se limpia.
- Presión disponible frente a presión requerida.
- Velocidad y tiempo del marraneo.
- Los diámetros internos de las líneas.
- Distancia máxima que debe recorrer el marrano.
- Radio de curvatura mínimo y ángulos de curvatura,
- Características adicionales como tipos de válvulas, conexiones de derivación y perfil de elevación.

1.6.4 Lanzamiento y Recepción de los Cerdos Raspadores

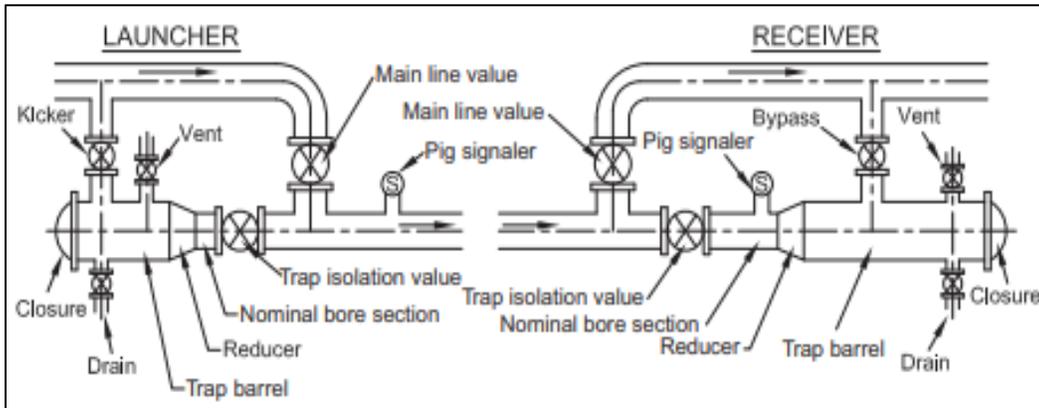
Existen unas facilidades denominadas trampas lanzadoras y receptoras de cerdos raspadores, las cuales permiten cómo su nombre lo dice, enviar y recibir un cerdo durante operaciones de inspección y mantenimiento de tuberías. Estas trampas están constituidas básicamente por tubos con arreglos de válvulas, bridas, instrumentación y venteos, que permitan la recepción y control del cerdo. Consiste simplemente en una sección de tubería de mayor diámetro respecto a la tubería objeto de limpieza, el mayor diámetro permite la fácil maniobrabilidad del cerdo, su lanzamiento y recuperación.

Según la aplicación requerida se pueden instalar trampas convencionales o trampas temporales removibles. Los lanzadores convencionales limitan la adaptabilidad de una operación de limpieza de tubería, producto del complejo diseño lo cual no permitiría adaptarse a cualquier sistema que requiera limpieza y mantenimiento. El trabajo en caliente y el requerimiento de precisión en la operación y fabricación hacen que no se

fomente su construcción para operaciones que no requieran mantenimiento e inspección frecuente.

Figura 5.

Trampas lanzadoras y receptoras



Nota: Esta figura muestra las trampas de marraneo convencionales. Tomado de: M. Stewart *Surface Production Operations, Pipe Line Design*. 225 Wyman Street, Waltham, MA 02451, USA Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier.

2 . METODOLOGÍA Y DATOS.

Para cumplir el primer objetivo, se hará una breve descripción del sistema de vertimiento para entrar en contexto. Se clasificará la información del sistema de vertimiento y problemática actual suministrada por Ecopetrol SA a través de un resumen técnico a, el cual se estructurará a partir de una clasificación de información de tres distintas categorías, las cuales son: **INFORMACIÓN DE DISEÑO** (diámetro y longitud de líneas, accesorios, topografía, control de flujo, sistema de bombeo), **INFORMACIÓN OPERATIVA** (guías y ventanas de control de las variables de proceso, alineaciones, instructivos operacionales, calidad de fluidos) e **INFORMACIÓN ADICIONAL** (pruebas de operación, premisas del caso en cuestión). Una vez recopilada la información requerida para el caso, se procede a establecer los criterios guía bajo los cuales se registrarán las alternativas de mejora. Estos criterios serán establecidos de acuerdo con los requerimientos operativos y económicos que garanticen la solución del problema de manera más eficaz.

Para el segundo objetivo y tercer objetivo, se realizará un análisis hidráulico aplicando la metodología de análisis nodal utilizando la herramienta PIPESIM de Schlumberger cuya licencia será suministrada por ECOPETROL S.A. Se planteará un modelo inicial que obedezca a las condiciones de operación y de diseño del sistema de vertimiento según la clasificación de información anterior, posteriormente se modificará el modelo para representar la problemática en la capacidad de flujo actual. Una vez hecho esto se crearán escenarios a partir de la modificación del modelo problema, donde se buscará conseguir reestablecer la capacidad volumétrica del sistema. Cada uno de los escenarios se evaluará bajo los criterios establecidos en el objetivo anterior y finalmente se hará la elección del modelo más óptimo según la anterior evaluación.

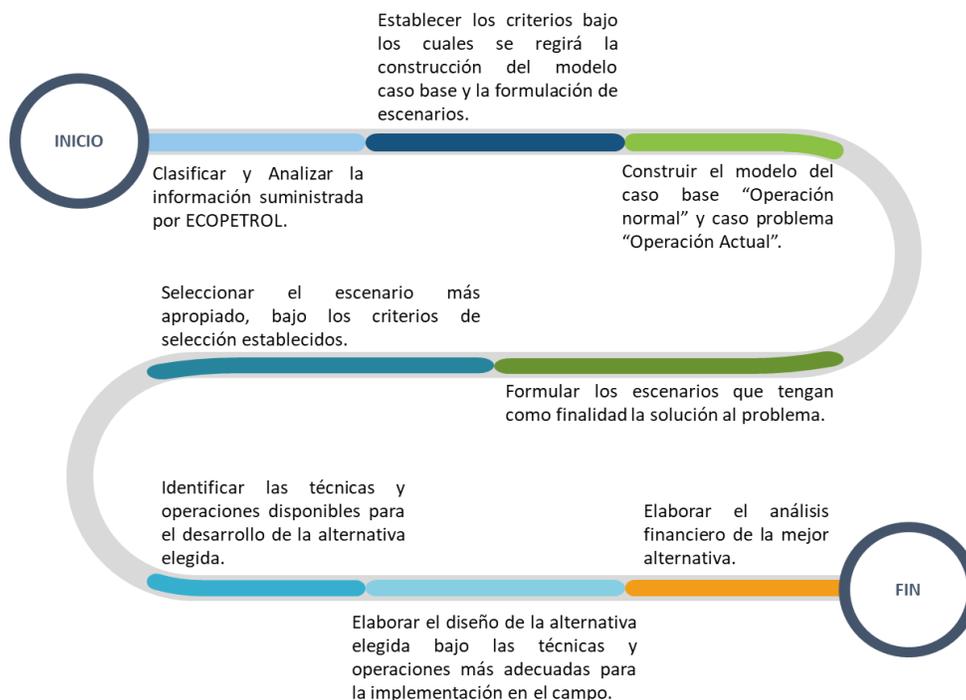
El cuarto objetivo se cumplirá identificando las técnicas disponibles para el desarrollo de la alternativa elegida en el objetivo anterior, haciendo referencia a; técnicas y tipos de operación, materiales y equipos requeridos, y se hará una selección de acuerdo con facilidad de implementación en el campo, (tiempo requerido, inversión, flexibilidad de operación). Una vez se haya seleccionado la técnica o metodología para dar cumplimiento a la alternativa elegida, se hará una propuesta del diseño de las facilidades

y/o procedimientos requeridos para el desarrollo de la alternativa, lo cual se dejará ilustrado en un diagrama de proceso en la herramienta VISIO o procedimiento operativo según el caso de la elección.

Finalmente, para alcanzar el quinto objetivo, se elaborará la evaluación financiera del diseño propuesto bajo el criterio de evaluación de proyectos de inversión **RELACIÓN COSTO-BENEFICIO**, debido a que señala cuál es el beneficio o costo que se obtiene por la realización de un proyecto. Se establecerán flujos de caja relacionados a la inversión realizada y al beneficio económico obtenido producto del restablecimiento de la capacidad volumétrica del sistema de vertimiento, el cual se verá reflejado en incremento de producción de crudo. Los factores requeridos para la formulación de la matemática financiera serán establecidos bajo criterio de los autores y los resultados obtenidos serán comparados con un análisis de escenarios

Figura 6.

Diagrama metodología para el desarrollo del trabajo



Nota. Esta tabla el diagrama establecido para la metodología bajo la cual se rige el trabajo.

2.1 Información de Diseño

El proceso de tratamiento para el agua de vertimiento se rige bajo ciertas variables de control tales como; la temperatura, parámetros fisicoquímicos como; oxígeno disuelto, cloruros, ph entre otras, para garantizar la clarificación del agua.

2.1.1 Control de Temperatura

Se cuenta con tres torres de enfriamiento, TE-1/2/3 cada una con una capacidad de operación de 100KBWPD. La Piscina de Inyección PIS-INY1 recibe el agua tratada proveniente de las Unidades de Filtración de los Paquetes de Tratamiento de Agua 1, 2, 3, 4 y 5 trenes y de la piscina PIS-AINY [3]. Del foso interconectado a la piscina PIS-TE se succiona agua por medio de cuatro bombas sumergibles P- PISTE A/B/C/D las cuales descargan al cabezal que conecta hacia las torres de enfriamiento TE-1/2/3 [4]. “Sobre este cabezal está ubicado el indicador trasmisor de presión PIT-TEA. Sobre la línea que conecta hacia las torres de enfriamiento TE-1/2/3 está ubicado el indicador de flujo FIT-PIS TEA y el indicador de temperatura TIT- PIS TEA” [4].

Tabla 1.

Datos de diseño Torres de Enfriamiento

DATOS DE DISEÑO TORRES DE ENFRIAMIENTO	
DIMENSIÓN	VALOR
Capacidad (KBLS)	100
Temperatura de diseño (°F)	190
Temperatura Operación (°F)	150
Alto (ft)	32,2
Ancho (ft)	23
Presión de Operación	(atm)

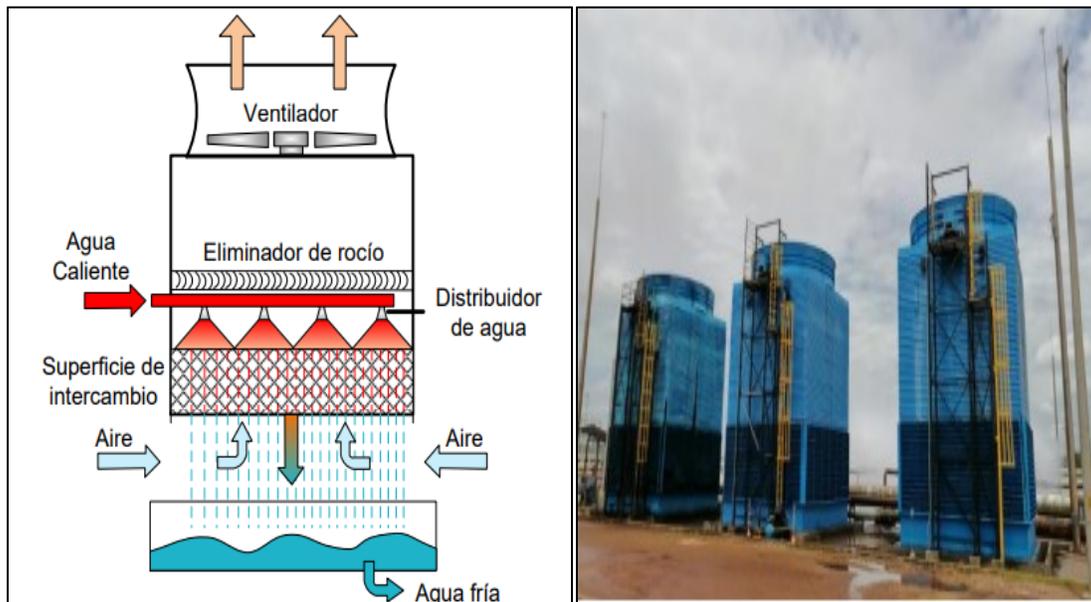
Nota. Esta tabla muestra los datos de diseño de las Torres de Enfriamiento. Tomado de: Instructivo Operacional para el sistema de Aspersión y enfriamiento de la Piscina de Vertimiento, 1ra ed, Ecopetrol S.A, Bogotá Colombia Cra. 13 #36-24, 2020.

“En las torres de enfriamiento se hace circular una corriente de aire a través del flujo de agua que sale de la parte superior con el propósito de favorecer el enfriamiento del agua a la temperatura ambiente, cumpliendo con el objetivo de enfriar y oxigenar el agua de proceso y dejarla a una temperatura adecuada” [5]. El agua enfriada que sale de las torres de enfriamiento pasa por los indicadores de temperatura TIT-TE 1/2/3 y se envía a la piscina de vertimiento PIS-ASPER. Para las Torres de Enfriamiento TE 1/2/3 los interlocks presentes son:

- “Por **alto-alto (HH)** a los 170 °F, **por alto (H)** a los 105 °F y **Por bajo (L)** a los 70, por **bajo-bajo (LL)** a los 50°F. VSH. Switch el cual por alta vibración apaga los ventiladores de las Torres de enfriamiento” [6].

Figura 7.

Torres de Enfriamiento



Nota. La figura representa el funcionamiento de las torres de enfriamiento. Tomado de: Manual de Descripción de Procesos de la Unidad Capítulo 4. Química y procesos unitarios producción Facilidad Central de Procesamiento. Coordinación de Producción Rubiales, 1ra ed, Ecopetrol S.A, Bogotá Colombia Cra. 13 #36-24, 2019.

2.1.2 Sistema de Aspersión

“En el proceso de aspersión llevado a cabo en la Piscina de Aspersión PIS-ASPER, “el agua es acondicionada hasta llevarla a 6 ppm de oxígeno disuelto y en donde ya se contaba con una concentración de hidrocarburos inferiores a 1 ppm al igual que cloruros inferiores a 180 ppm y temperatura inferior a 40°C” [7]. El sistema de aspersión compuesto por las unidades de bombeo P-ASP(A/B/C) y las boquillas de aspersión [4], comienza su recorrido en la fosa de donde las unidades de bombeo succionan el fluido y se encargan de suministrar presión al mismo para que este pueda llegar a las boquillas y ahí se genere el efecto de aspersión; dicho efecto consiste en circular un volumen de agua a gran velocidad por los aspersores, generando dispersión en el aire, disminuye la temperatura del agua, facilita la integración de oxígeno disuelto en el agua y posterior una distribución sobre la superficie de la piscina.

La zona de entrada de la piscina de vertimiento PIS-ASPER cuenta con el indicador de nivel LIT-ASPB [4], el cual mostrará el nivel en mm de llenado de la piscina, esta zona es la encargada de recibir el agua enfriada que viene de las torres de enfriamiento TE-1/2/3. De la zona de entrada succiona agua por medio de las bombas P-ASP A/B/C y se envía a las boquillas de aspersión [4]. La piscina de aspersión cuenta con los siguientes Interlocks: LIT- ASPB, por **alto-alto (HH)** a los 2900mm, por **alto (H)** a los 2880mm, por **bajo (L)** a los 2620mm, por **bajo-bajo (LL)** a los 2400mm [6].

Tabla 2.

Datos de diseño boquillas Sistema de Aspersión

DATOS DE DISEÑO BOQUILLAS DE ASPERSIÓN	
DIMENSIÓN	VALOR
Número de brazos	4
Boquillas por brazo	28
Total, boquillas	112
Capacidad boquillas (GPM)	78
Temperatura de Operación (°F)	113
Presión de Operación (Psi)	26,3

Nota. Esta tabla muestra los datos de diseño del sistema de Aspersión. Tomado de: Instructivo Operacional para el sistema de Aspersión y enfriamiento de la Piscina de Vertimiento, 1ra ed, Ecopetrol S.A, Bogotá Colombia Cra. 13 #36-24, 2020.

Tabla 3.

Datos de diseño Bombas Sistema de Aspersión

DATOS DE DISEÑO BOMBAS SISTEMA DE ASPERSIÓN	
DIMENSIÓN	VALOR
Tipo de Bomba	Centrifuga
Caudal (GPM)	4500
Presión de Descarga (Psig)	60
Potencia (HP)	200
Temperatura de Operación (°F)	113
Presión de Operación (Psi)	55
Revoluciones (RPM)	1760
Marca Bomba	American Marsh Pumps
Marca Motor	Simens
Fluido de Trabajo	Agua

Nota. Esta tabla muestra los datos de diseño de las Bombas sistema de Aspersión. Tomado de: Instructivo Operacional para el sistema de Aspersión y enfriamiento de la Piscina de Vertimiento, 1ra ed, Ecopetrol S.A, Bogotá Colombia Cra. 13 #36-24, 2020.

Tabla 4.

Datos de diseño Piscina de Aspersión

DIMENSIÓN	VALOR
Presión de Operación (Psi)	14,7
Presión de Diseño (Psi)	14,7
Presión de Descarga (Psig)	60
Largo (Ft)	167,2
Ancho (Ft)	166,7
Altura (Ft)	8,2
Nivel de Rebose (Ft)	6,9
Nivel de Succión (Ft)	5,7
Capacidad	ND

Nota. Esta tabla muestra los datos de diseño de las Bombas sistema de Aspersión. Tomado de: Instructivo Operacional para el sistema de Aspersión y enfriamiento de la Piscina de Vertimiento, 1ra ed, Ecopetrol S.A, Bogotá Colombia Cra. 13 #36-24, 2020.

2.1.3 Sistema de Vertimiento

“Del sumidero de captación de agua de la piscina PIS-ASPER se succiona agua por medio de las Bombas centrifugas verticales VERT-PUMP A/B/C/D de 100KBPD de capacidad, las cuales descargan al cabezal que conecta hacia los vertimientos”. La descarga de las bombas VERT-PUMP A/B/C/D cuenta con el indicador transmisor de presión PIT-VPUMP y el indicador transmisor de temperatura TIT- VPUMP. El flujo que se envía hacia los vertimientos C, D y E se registra por medio del indicador FIT- VPUMP y se regula por medio de las válvulas de flujo FV VPUM A/B/C” [4], cumpliendo con la disposición bajo parámetros de calidad y los lineamientos básicos para manejo y vertimiento de aguas residuales.

Tabla 5.

Datos de diseño Bombas Sistema de Vertimiento

DATOS DE DISEÑO BOMBAS SISTEMA DE VERTIMIENTO	
DIMENSIÓN	VALOR
Tipo de Bomba	Centrifuga
Caudal (GPM)	2932
Presión de Descarga (Psig)	90
Potencia (HP)	200
Temperatura de Operación (°C)	40
Corriente (AMPS)	227
Voltaje (V)	460
Frecuencia (Hz)	60
Presión de Operación (Psi)	26,3
Revoluciones (RPM)	1780
Eficiencia	94,1
Fluido de Trabajo	Agua

Nota. Esta tabla muestra los datos de diseño de las Bombas sistema de Vertimiento. Tomado de: Instructivo Operacional para el sistema de Aspersión y enfriamiento de la Piscina de Vertimiento, 1ra ed, Ecopetrol S.A, Bogotá Colombia Cra. 13 #36-24, 2020.

Las bombas VPUMP A/B/C/D Cuentan con los interlocks de presión alertando una infracción a los rangos establecidos y evitando así que se superen los límites establecidos para esta variable. Por **alto-alto (HH)** a los 128ps, por **alto (H)** a los 115psi, **por bajo (L)** a los 60psi, y por **bajo-bajo (LL)** a los 0psi [6].

Figura 8.

Cabezal de descarga hacia vertimiento



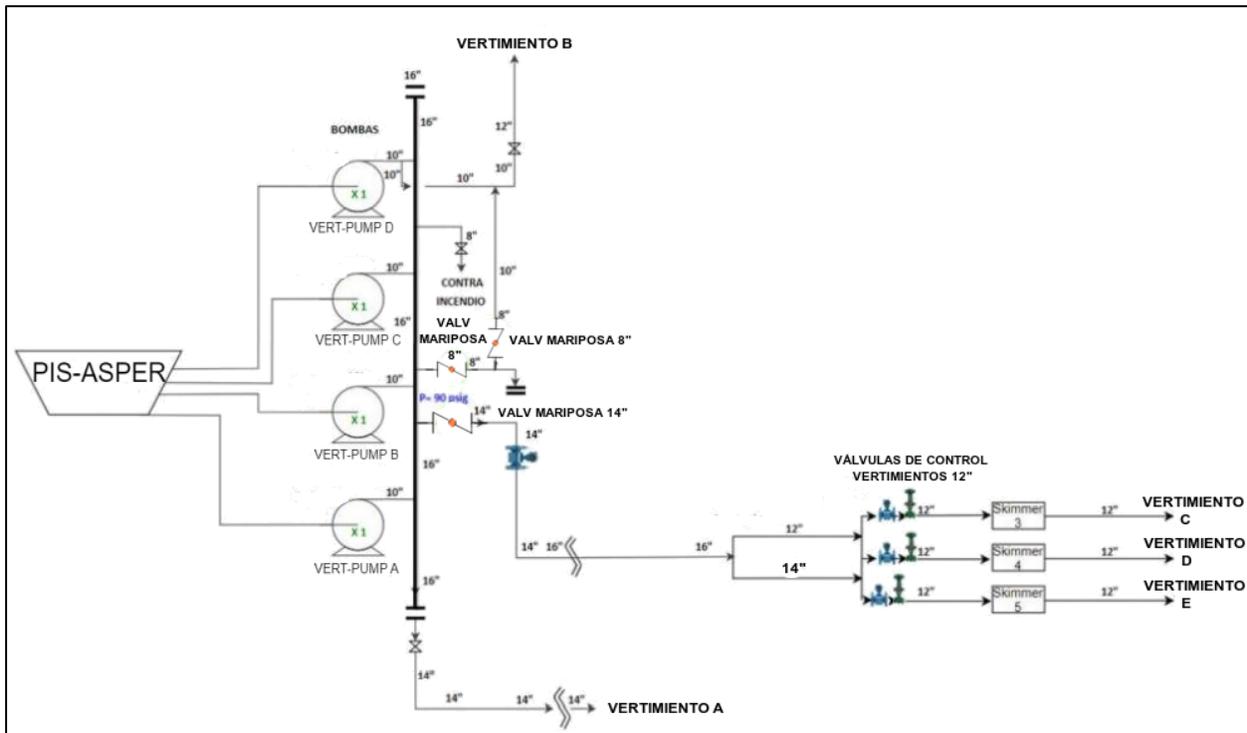
Nota. Cabezal de Descarga de las bombas Hacia Vertimiento. Tomado de: Mejora de Vertimientos Campo Rubiales, 1ra ed, Ecopetrol S.A, Bogotá Colombia.

Estas bombas descargan en un cabezal de 16in y el agua de vertimiento se distribuye hacia:

- «VA (60KBWPD), mediante una línea de 14” desde el cabezal de descarga de las bombas en la planta, hasta el sitio de vertimiento con una longitud de 873 metros. Se tiene un medidor en la descarga de las bombas, localizado en la PLANTA-A.
- VB (60 KBWPD), mediante una línea de 12” desde el cabezal de descarga de las bombas en la planta, hasta el sitio de vertimiento con una longitud de 362 metros. Por gravedad, se verte al sitio autorizado. Cuenta con su propio medidor de flujo ubicado a 6 m de la descarga del tubo.
- VC-VD-VE (180 KBWPD), sale en 14in, seguidamente amplía a 16in y posteriormente el fluido se bifurca en el límite de la piscina (fuera del límite de la planta) en dos líneas una de 14in y otra de 12in con 2.147 metros hasta el cabezal de descarga, y cuenta con su propio medidor de flujo localizado en sitio, allí se divide en tres líneas de 12in para descargar a los tres puntos de vertimiento VC, VD y VE. El brazo No. 1 con una longitud aproximada de 390 metros corresponde a las coordenadas del punto 4, el brazo 2 con una longitud aproximada de 450 metros corresponde a las coordenadas del punto 5 y el brazo 3 con una longitud aproximada de 670 metros corresponde a las coordenadas del punto 3.» [8]

Figura 9.

Diagrama de distribución del Sistema de Vertimiento



Nota. Esta figura muestra el esquema del proceso de vertimiento. Tomado de: *Mejora de Vertimientos Campo Rubiales*. Mejora de Vertimientos Campo Rubiales, 1ra ed, Ecopetrol S.A, Bogotá Colombia.

Tabla 6.

Coordenadas de los Puntos de Vertimiento

COORDENADAS PUNTOS DE VERTIMIENTO		
PUNTO DE VERTIMIENTO	COORDENADAS	
	ESTE	NORTE
1	960.257,175	913.506,961
2	960.452,335	913.453,605
3	962.317,931	913.333,441
4	962.522,399	913.508,114
5	962.986,393	913.020,849

Nota. Esta figura muestra las coordenadas de los 5 puntos de Vertimiento. Tomado de: Portal ANLA “RESOLUCIÓN NÚMERO (2355) 24 de diciembre de 2007”. [En Línea]. Disponible en: http://portal.anla.gov.co/sites/default/files/13147_res_0836_250714.pdf. [Acceso: Abril, 2021].

2.1.4 Sistema de Protección Para la Descarga del Vertimiento

El flujo a los cinco puntos de vertimiento es controlado a través de válvulas de control de flujo FV-VA/VB/VC/VD/VE, válvulas neumáticas. “Para la descarga del agua industrial tratada al caño Rubiales se cuenta con una serie de equipos de salvaguarda ambiental, que corresponden a un skimmer de protección y a los descoles de llegada. Los skimmer de concreto tienen la capacidad de retención de pequeñas trazas de crudo que pudiesen pasar a través de los sistemas de tratamiento que al igual funcionan de puntos de control en caso de contingencia” [8]. En los puntos de llegada del agua al caño se cuenta con descoles con el propósito de minimizar el impacto del agua sobre el cauce del caño Rubiales y prevenir la erosión lateral.

Figura 10.

Sistema de protección para la descarga vertimiento C, D y E



Nota: Esta figura muestra los Skimmer y Válvulas de Control del sistema de Vertimiento. Tomado de: Instructivo Operacional para el sistema de Aspersión y enfriamiento de la Piscina de Vertimiento, 1ra ed, Ecopetrol S.A, Bogotá Colombia Cra. 13 #36-24, 2020.

2.2 Información operacional.

A continuación, se menciona la información operativa asociada al actual sistema de vertimiento de Campo Rubiales, guías de control y ventanas operativas. Son los límites establecidos como parámetros de control dentro de los cuales se debe mantener la operación de unidades y equipos de proceso, que tienen como objetivo informar al operador los límites de la operación que está controlando, dichos parámetros se controlan permanentemente para mitigar el riesgo de cualquier tipo de incidente.

2.2.1 Ventanas Y Guías De Control Operativas

Las Guías de Control son los valores de las variables de proceso bajo los cuales se rige la operación, considerándose un rango operativo. Las Ventanas Operativas son los valores límite que pueden tomar cada una de las variables de control de proceso, que tienen como fin salvaguardar la integridad

Tabla 7.

Ventanas y Guías de Control Operativas

EQUIPO / ÁREA	EQUIPO CRITICO RUBIALES 2017	NOMBRE DE VARIABLE	Unidad	RANGO DE LA VARIABLE		RANGO DE LA VARIABLE	
				GUÍA DE CONTROL		VENTANA OPERATIVA DE INTEGRIDAD	
				BAJA	ALTA	BAJA	ALTA
Skimmer	NO	Nivel	Mm	1.700	2.000	1.600	2.100
Piscina de Vertimiento PIS-ASPER	NO	Nivel - Sumidero PIS-ASPER	Mm	2.500	2.800	2.400	2.880
		Nivel- PIS-ASPER	Mm	2.500	2.800	2.400	2.880
Bombas VERT-PUMP A/B/C/D	NO	Presión descarga	PSIG	78	99	67	100
		Temperatura	C	25	40	-	43
Agua a PIS-ASPER	NO	Flujo a vertimientos A, B, C, D y E	BPD	55.000	61.000	50.000	65.000
		Flujo vertimientos C, D y E	BPD	165.000	183.000	150.000	195.000
Torres de enfriamiento TE-1/2/3	NO	Temperatura Agua después de torres	°F	77	104	-	109
Piscina de Vertimiento e Inyección	SI	Nivel - Foso succión	Mm	2.900	3.700	2.700	3.900
Bomba P- PISTE A/B/C/D	NO	Presión descarga BOMBAS	PSIG	273,0	295,0	240,0	300,0
		Presión descarga línea de transferencia	PSIG	240,0	295,0	-	300,0

Nota. En la tabla se muestran los principales parámetros de control de los equipos que impactan el vertimiento. Elaborado en base a guías de control y ventanas operativas del sistema de vertimiento.

2.2.2 Controles de Proceso

Los controladores (controles) de proceso son los lazos de control de propósito único más comunes. El controlador, localmente o desde una consola remota, ingresa un punto de ajuste (setpoint) y el lazo de control mantiene ese punto automáticamente. En el presente proyecto es necesario conocer y controlar los parámetros requeridos en la sección de transferencia de agua para que cumpla con los estándares de la empresa y directrices de calidad del agua. A continuación, se muestran los controles principales a tener en cuenta para el desarrollo del mismo:

Tabla 8.

Controles de Flujo

Número y Nombre de Etiqueta	Rango de Operación (Normal)	Objetivo del Control	Consecuencias de Desviación (Alta y Baja)
FIT- P- PISTE A/B/C/D Flujo agua entrada Torres de Enfriamiento TE-1/2/3	0 a 500 KBPD	Indica el flujo de agua de entrada a las Torres de Enfriamiento TE-1/2/3	Alto Flujo: Altas temperaturas en el agua de disposición /vertimiento. Bajo Flujo: Inestabilidad de los niveles de la piscina P-PISTE. Presurización de las bombas de transferencia. Daño en el impeler y carcasa de la bomba de transferencia, así como recalentamiento de la bomba con posible daño a sellos. Recalentamiento del motor eléctrico. Vibración del equipo generando desajuste, daño en rodamientos y acople del motor.
FIT- VPUMP Flujo agua hacia vertimiento C/D/E desde la piscina PIS- ASPER	0 a 300 KBPD	Indica el flujo de agua que proviene de las bombas VERT-PUMP A/B/C/D asociadas a la piscina de vertimiento PIS- ASPER y que se dirige hacia el vertimiento C, D y E.	Alto Flujo: Daño de los componentes mecánicos internos de la bomba de transferencia. Vibración del equipo generando desajuste, daño en rodamientos y acople del motor. Operación por fuera de la curva de diseño de la bomba. Bajo nivel en la piscina de transferencia. Bajo Flujo: Inestabilidad de niveles en la piscina. Posible rebose en los paquetes de tratamiento de agua. Presurización de las bombas de transferencia. Daño en el impeler y carcasa de la bomba de transferencia, así como recalentamiento de la bomba con posible daño a sellos. Recalentamiento del motor eléctrico. Vibración del equipo generando desajuste, daño en rodamientos y acople del motor.

Nota. En la tabla se muestran los controladores de flujo. Tomado de: Manual de Descripción de Procesos de la Unidad Capítulo 6. Estrategias de control y consecuencias de desviación. Coordinación de Producción Rubiales, 1ra ed, Ecopetrol S.A, Bogotá Colombia Cra. 13 #36-24, 2019.

Tabla 9.

Controles de Nivel

Número y Nombre de Etiqueta	Rango de Operación (Normal)	Objetivo del Control	Consecuencias de Desviación (Alta y Baja)
LIT-ASPB Nivel total foso de aquietamiento de la piscina PIS-ASPER	2700 a 2850 mm	Indica el nivel total del foso de aquietamiento de la piscina de vertimiento PIS-ASPER	Alto Nivel: Genera rebosamiento y contaminación al medio ambiente. Bajo Nivel: NA
LIT-ASPA Nivel total sumidero de captación de agua de la piscina PIS-ASPER	2700 a 2850 mm	Indica el nivel total del sumidero de captación de agua de la piscina de vertimiento PIS-ASPER	Alto Nivel: Genera rebosamiento y contaminación al medio ambiente. Bajo Nivel: Arrastre de aceite hacia los puntos de vertimiento, lo cual genera contaminación al medio ambiente. Genera el apagado de las bombas de transferencia de la piscina -PIS-INY.

Nota. En la tabla se muestran los controladores de Nivel. Tomado de: Manual de Descripción de Procesos de la Unidad Capítulo 6. Estrategias de control y consecuencias de desviación. Coordinación de Producción Rubiales, 1ra ed, Ecopetrol S.A, Bogotá Colombia Cra. 13 #36-24, 2019.

Tabla 10.

Controles de Presión

Número y Nombre de Etiqueta	Rango de Operación (Normal)	Objetivo del Control	Consecuencias de Desviación (Alta y Baja)
PIT-VPUMP Presión descarga bombas VERT-PUMP A/B/C/D	80 a 100 Psig	Indica la presión en el cabezal de descarga de las bombas VERT-PUMP A/B/C/D asociadas a la piscina de vertimiento PIS-ASPER	Alta Presión: Genera alta vibración en la bomba y líneas de transferencia, ocasionado daño en las líneas de tubería (Ruptura), rodamientos de la bomba y sello mecánico. Genera calentamiento y cavitación en la bomba, causando daño en los impulsores y difusores, rodamientos y sello de la bomba. Baja Presión: Genera cavitación y vibración en la bomba, ocasionado daño en los difusores, impulsores, rodamientos y sello mecánico de la bomba. Se afecta la operación de vertimiento/disposición.

Nota. En la tabla se muestran los controladores de Presión. Tomado de: Manual de Descripción de Procesos de la Unidad Capítulo 6. Estrategias de control y consecuencias de desviación. Coordinación de Producción Rubiales, 1ra ed, Ecopetrol S.A, Bogotá Colombia Cra. 13 #36-24, 2019.

Tabla 11.

Controles de Temperatura

Número y Nombre de Etiqueta	Rango de Operación (Normal)	Objetivo del Control	Consecuencias de Desviación (Alta y Baja)
TIT- PIS TEA Temperatura entrada torres de enfriamiento TE-1/2/3	90 a 105 °F	Indica la temperatura a la entrada de las Torres de Enfriamiento TE-1/2/3	Alta Temperatura: Si el fluido entra a la torre con mayor temperatura, genera aumento de temperatura en el fluido transferido hacia la piscina de vertimiento PIS-INY ocasionado que no se cumplan los estándares ambientales de vertimiento. Nos puede generar tener que operar la torre con menos caudal de entrada, para que el extractor tenga la capacidad de bajar la temperatura al punto óptimo de operación Baja Temperatura: N/A.
TIT TE-1/2/3 Temperatura salida torres de enfriamiento TE-1/2/3	90 a 105 °F	Indica la temperatura a la salida de las Torres de Enfriamiento TE-1/2/3	Alta Temperatura: Genera que la transferencia de fluido a los vertimientos A, B, C, D y E se suspenda por no cumplir con la temperatura adecuada. Baja Temperatura: N/A.
TIT- VPUMP Temperatura descarga bombas VERT-PUMP A/B/C/D	90 a 105 °F	Indica la temperatura de descarga de las bombas VERT-PUMP A/B/C/D asociadas a la piscina de vertimiento PIS-ASPER	Alta Temperatura: Genera que la transferencia de fluido a los vertimientos A, B, C, D y E se suspenda por no cumplir con la temperatura adecuada para cumplir los estándares ambientales. Baja Temperatura: N/A.

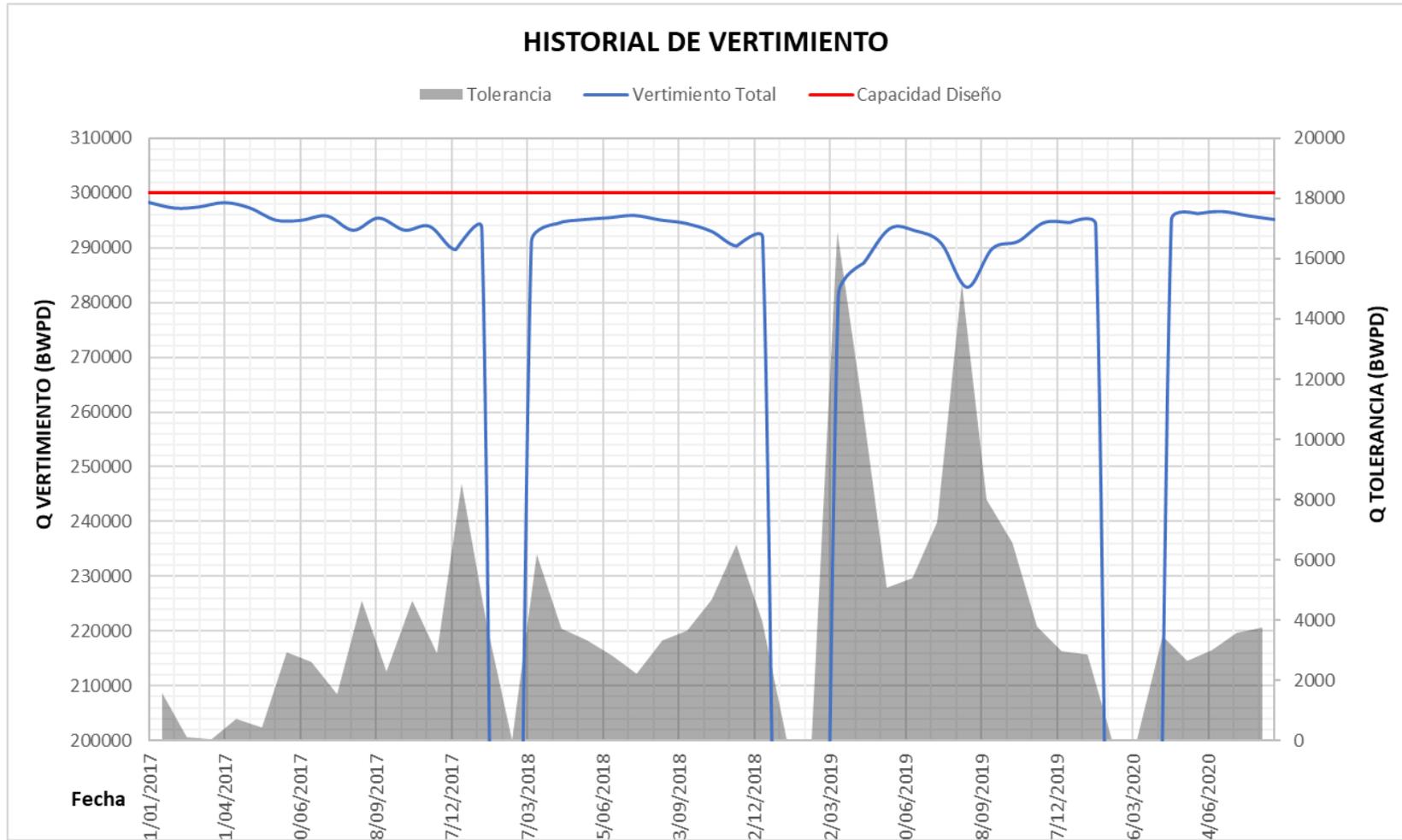
Nota. La tabla muestra los parámetros de control y desviación de Temperatura. Tomado de: Manual de Descripción de Procesos de la Unidad Capítulo 6. Estrategias de control y consecuencias de desviación. Coordinación de Producción Rubiales, 1ra ed, Ecopetrol S.A, Bogotá Colombia Cra. 13 #36-24, 2019.

2.2.3 Información Adicional

- De acuerdo con el documento de mejoras del sistema de vertimiento, existió un antecedente de pérdida de integridad en la válvula de control FV VPUM A, en la línea hacia vertimiento C, presentaba deterioro excesivo la brida de salida. La válvula fue cambiada en julio de 2017.
- “Para los puntos de vertimiento C y D, las válvulas de control FV VPUM A y FV VPUM B normalmente operan entre 40% y 70% de apertura y es factible alcanzar los 60kBWPD en cada línea, mientras que la válvula hacia el punto E, FV VPUM C, se mantiene totalmente abierta, pero las condiciones operacionales, de distancia y topografía del punto 5, no permiten alcanzar los 60 kBWPD” [9].
- “La bomba VERT-PUMP B presentó disminución de capacidad de funcionamiento comparado con las otras bombas, debido a que no fue reparada cuando hubo parada de vertimiento. Esta bomba aporta en promedio 45kBWPD en lugar de 75kBWPD promedio” [9]. Posteriormente se realizó un mantenimiento correctivo, permitiendo ajustar la bomba a las condiciones operativas requeridas.
- De acuerdo con los datos históricos de vertimiento suministrados a partir del 2017, desde esta fecha luego de una parada del sistema de vertimiento no se consigue alcanzar los 300 KBWPD en el sistema de vertimiento, evidenciando periodos de caída en la capacidad hasta casi los 285KBWPD, probablemente estos volúmenes críticos sean asociados a contingencias en la operación, sin embargo, es evidente que el sistema de vertimiento ha perdido capacidad volumétrica desde esta fecha, y como se evidencia en la **Figura 11**, finalmente desde el año 2020 se tiene una pérdida de capacidad de aproximadamente 4000BWPD.
- En los datos de volumen por vertimiento se puede evidenciar que los puntos de vertimiento que presentan mayor pérdida de capacidad volumétrica son los vertimientos D y E. Aunque en la data histórica los vertimientos A y B no cumplen con los 60KBWPD, esto es producto de las alineaciones operativas para compensar volúmenes y presiones, si se incrementa la apertura de las válvulas de control de flujo de los vertimientos A y B se consigue llegar a los 60KBWPD C/U.

Figura 11.

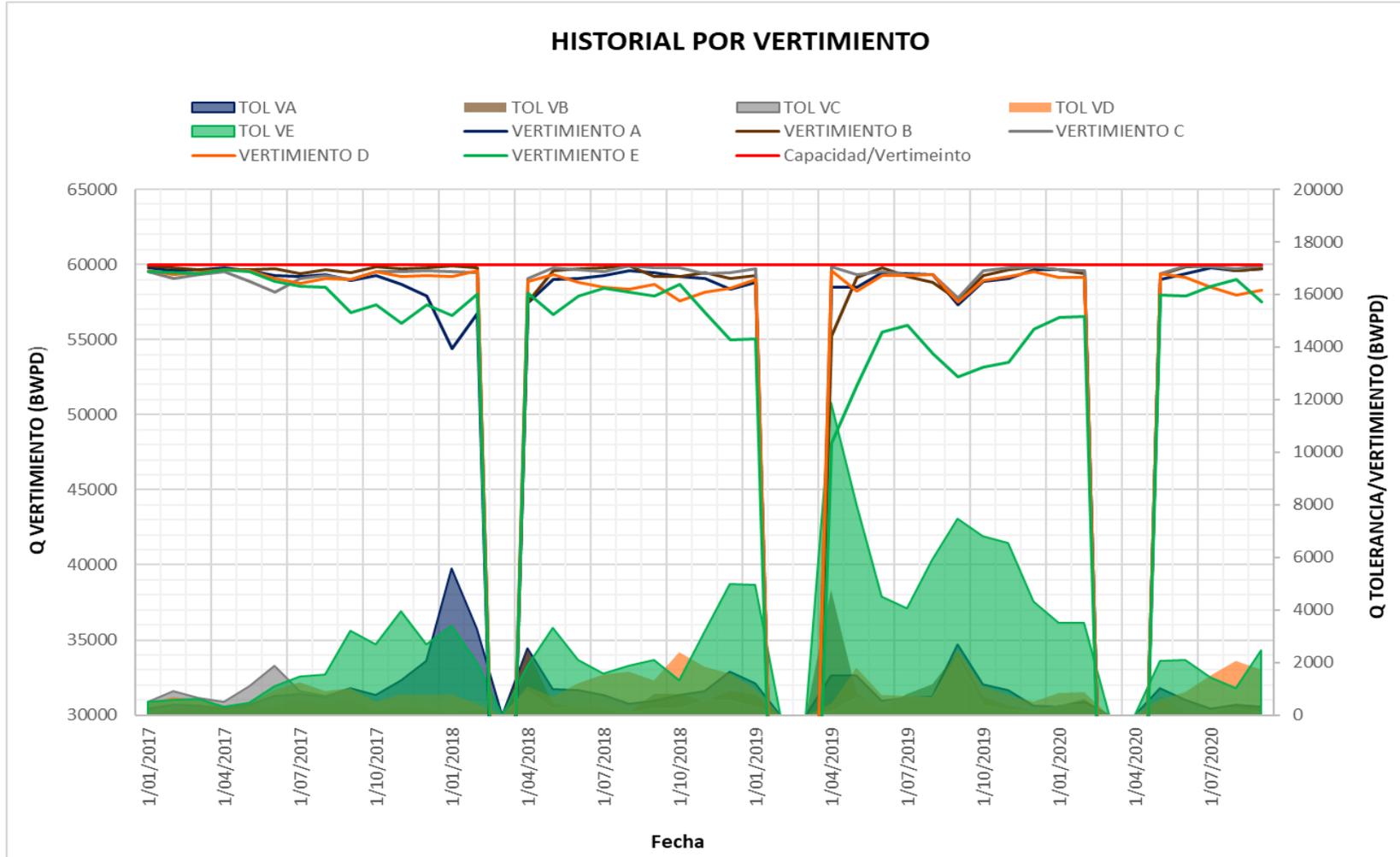
Data Histórica de Vertimiento



Nota. Esta figura muestra la gráfica de vertimiento histórica desde 2017 hasta fines de 2020, se puede identificar el volumen vertido, la tolerancia o volumen restante para la capacidad, y la línea de capacidad de diseño.

Figura 12.

Data Histórica de Cada Vertimiento



Nota. Esta figura muestra la gráfica de vertimiento histórica desde 2017 hasta fines de 2020, se puede identificar el volumen vertido, la tolerancia, para cada uno de los vertimientos.

2.3 Criterios de diseño simulación caso base

Para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos se consideran las siguientes premisas para la elaboración del caso de simulación base, esto con el fin de obtener información representativa de las condiciones del sistema de vertimiento.

Figura 13.

Diagrama Criterios de Diseño Caso de Simulación



Nota. Este diagrama muestra cada los criterios de diseño tenidos en cuenta para la elaboración del caso de simulación.

1. La piscina de aspersión de la cual se transfiere el agua hacia los respectivos 5 puntos de vertimiento tiene la capacidad disponible para satisfacer los caudales de vertimiento requeridos, en este caso 300 KBWPD distribuidos en 60 KBWPD en cada uno de los 5 puntos de vertimiento.
2. El fluido de proceso es agua, considerado como un fluido incompresible, no se consideran cambios de temperatura significativos por lo cual se modela como un caso isotérmico.
3. La variable presión de descarga está definida en base a la curva del fabricante, teniendo en cuenta esto se consideran las unidades en operación a una frecuencia de 60 Hz, que deben respetar los rangos operativos definidos por las guías de control del proceso establecidas por Ecopetrol, en este caso particular para las bombas de transferencia de vertimiento se debe respetar el rango BAJO-ALTO (78-99) Psig.

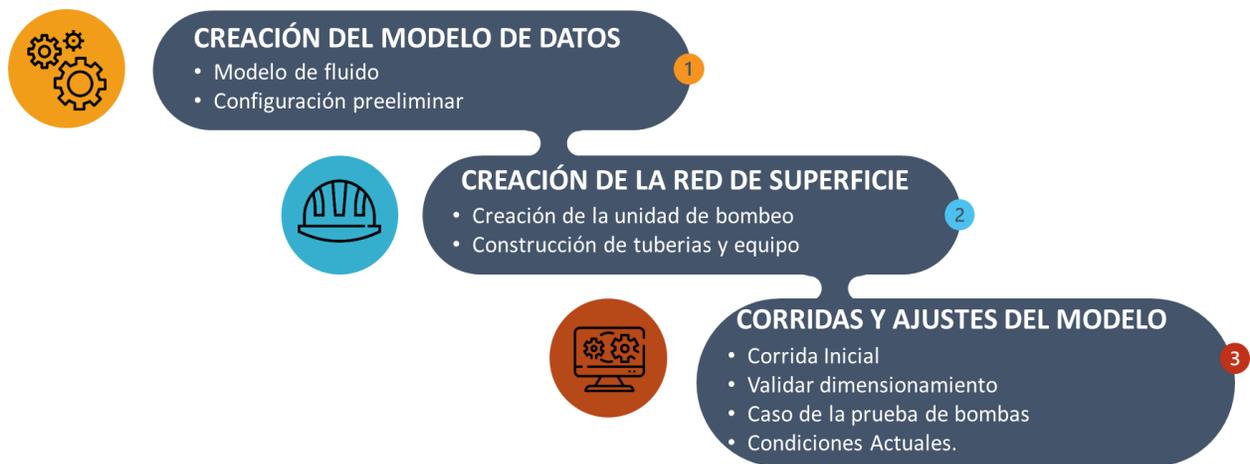
4. En operación normal se tienen alineadas 3 unidades y una de back up, por lo cual en análisis del caso actual se realizará de esta manera.
5. Los tendidos de línea hacia los respectivos puntos de vertimiento reposan en superficies de marco H de acero, por lo cual el factor de ondulación de las tuberías se mantiene por default (10) teniendo en cuenta que se cuenta con el perfil de elevación.
6. Los cambios de elevación son representados por los perfiles topográficos de la zona, suministrados por la compañía.
7. Las pérdidas de presión de las líneas de los VA y VB a la salida de la planta no son significativas de acuerdo con el perfil de elevaciones en los respectivos puntos de vertimiento y su distancia, por lo cual no son considerados. Estos cumplen con el requerimiento de caudal.
8. La fuente de suministro de agua, en este caso la piscina de aspersión se encuentra a 17.58 psia y 88 degF unidades de proceso.
9. El requerimiento de presión en el manifold de distribución de fluido hacia los 3 puntos de vertimiento VB, VD, VE sea al menos 30 Psig para alcanzar el requerimiento en caudal.
10. Se utiliza la ecuación de Hazen-Williams debido a que esta correlación se basa en la asunción de agua como fluido de proceso a 60°F, con flujo turbulento. Esta correlación permite considerar la relación del factor de fricción respecto a la rugosidad de la tubería en función de su tiempo de uso, de esta manera se consigue información representativa del caso.
11. Los criterios tiempo y flexibilidad de implementación no son excluyentes de los criterios económicos para la toma de una decisión, deben complementarse de acuerdo con los requerimientos de la compañía.
12. Se asume que el sistema hidráulico no presenta fugas, y que la integridad de es aceptable y se encuentra en condiciones aptas.

2.4 Creación del Caso de Simulación

Para la creación del caso de simulación, se deben seguir los siguientes pasos, cada uno de estos pasos tiene un flujo de trabajo asociado, el cual estará representado por la descripción del procedimiento que se debe llevar a cabo teniendo en cuenta las consideraciones establecidas para el caso de estudio de optimización del sistema de vertimiento de Campo Rubiales, y se debe mostrar evidencia de la interfaz de simulador.

Figura 14.

Diagrama Creación del Caso de Simulación



Nota. Esta figura muestra el diagrama de flujo para la creación del modelo de simulación.

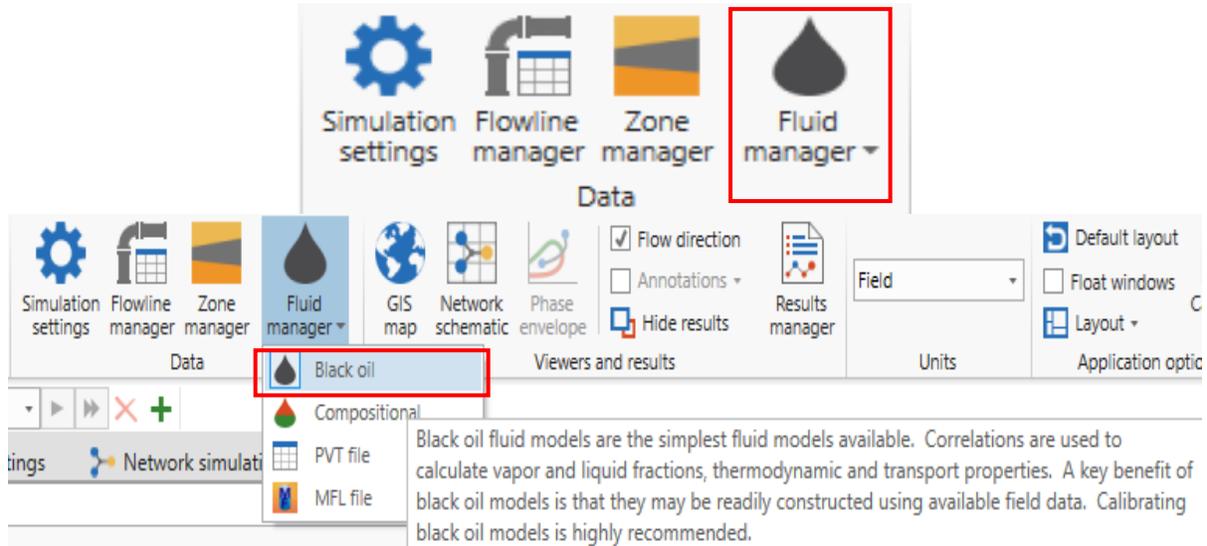
2.4.1 Creación del Modelo de Datos

La creación del modelo de datos es el paso principal para la construcción del caso de simulación, en este paso se deben especificar las características del fluido bajo el cual se va a modelar y simular el sistema, y además se deben establecer las configuraciones del simulador.

2.4.1.a Modelo de Fluido. En este apartado se debe establecer el modelo de fluido para el caso base de simulación. Inicialmente para la creación del caso se debe establecer el modelo de fluido a utilizar, para lo cual se sigue el siguiente flujo de trabajo; en la pestaña HOME, en la barra de opciones Data, en el ícono Fluid manager, se presiona y se despliega la respectiva ventana para especificar un nuevo modelo de fluido.

Figura 15.

Selección modelo de Fluido



Nota. Esta figura muestra las pestañas del simulador donde se crea el modelo de fluido. Elaboración propia, interfaz PIPESIM.

Para el presente caso, se tiene un modelo de fluido un tipo de fluido Black Oil general Denominado “**AGUA_VERTIMIENTO**” con un corte de agua del 99,99%, 0 GLR gravedad específica de 1,02, API 16%. Se establece este tipo de modelo debido a que el simulador cuenta con dos principales modelos de fluido, **Black Oil** y **Compositional**, donde el más acertado para el presente trabajo es el primero ya que es la opción estándar, la cual permite especificar las propiedades del fluido de trabajo que lo modelan como agua, teniendo en cuenta que su composición a condiciones de presión y temperatura es considerada constante. Dichas propiedades se establecen de acuerdo con información confidencial suministrada por la compañía.

Figura 16.

Propiedades del Modelo de Fluido

FLUID
Name: AGUA_VERTIMIENTO Save as template
Description:

Properties Viscosity Calibration Thermal

STOCK TANK PROPERTIES

Watercut	99.99	%
GLR	0	SCF/STB
Gas specific gravity	0.64	
Water specific gravity	1.02	
API	16	dAPI

CONTAMINANT MOLE FRACTIONS

CO2 fraction	0
H2S fraction	0
N2 fraction	0
H2 fraction	0
CO fraction	0

PIPESIM Close

Nota. Esta figura muestra la ventana de propiedades del modelo de fluido. Elaboración propia, interfaz PIPESIM.

Modelo de viscosidad de **Vasquez & Beggs**, establecido por default, tiene rango de aplicabilidad de: **Pb** (50-5250 psia), **T** (70-295 °F), **API** (16-58), **Yg** (0.56-1.18) y **Rsb** (20-2070 scf/STB) [10].

Figura 17.

Modelo de Viscosidad

FLUID
Name: AGUA_VERTIMIENTO Save as template
Description:

Properties Viscosity Calibration Thermal

UNDERSATURATED OIL

Correlation: Vasquez & Beggs

LIVE OIL

Correlation: Chew & Connally

DEAD OIL

Correlation: Beggs & Robinson

Temperature (1st): 200 degF

Viscosity (1st): 10.96763 cP

Temperature (2nd): 60 degF

Viscosity (2nd): 18277.51 cP

MIXTURE

Emulsion viscosity method: Set to viscosity of the continuous p...

Inversion watercut: Specify Calculate

60 %

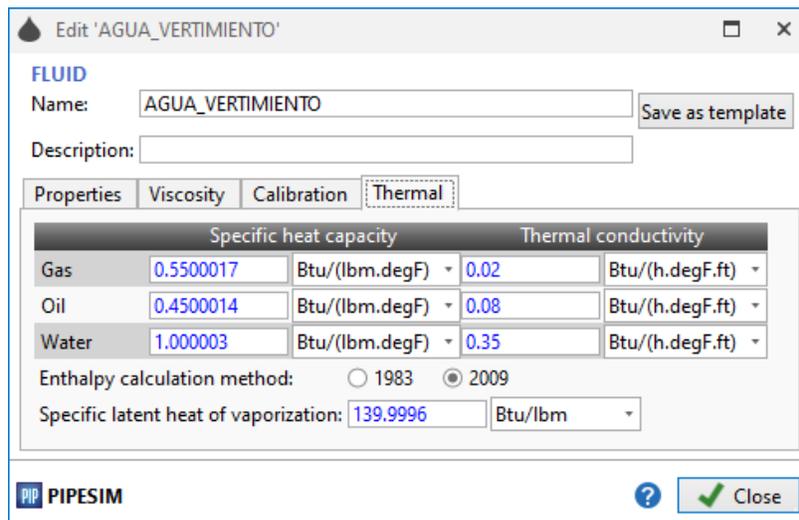
PIPESIM Close

Nota. Esta figura muestra la ventana donde se define el modelo de viscosidad de fluido. Elaboración propia, interfaz PIPESIM.

Para el presente caso no se ejecuta la calibración de las propiedades de los fluidos debido a que no se cuenta con información PVT del fluido en cuestión, han sido proporcionados datos específicos y puntuales que no son suficientes para la calibración del modelo de fluido.

En cuanto a las propiedades térmicas, se establecen ciertos parámetros que afectan la transferencia de calor, tales como; **Calor específico, Conductividad térmica y Calor latente de vaporización**. Dichas propiedades relacionan el comportamiento del modelo de fluido ante cambios de temperatura y sus consecuencias en cambios de fase.

Figura 18.
Modelo de Termal



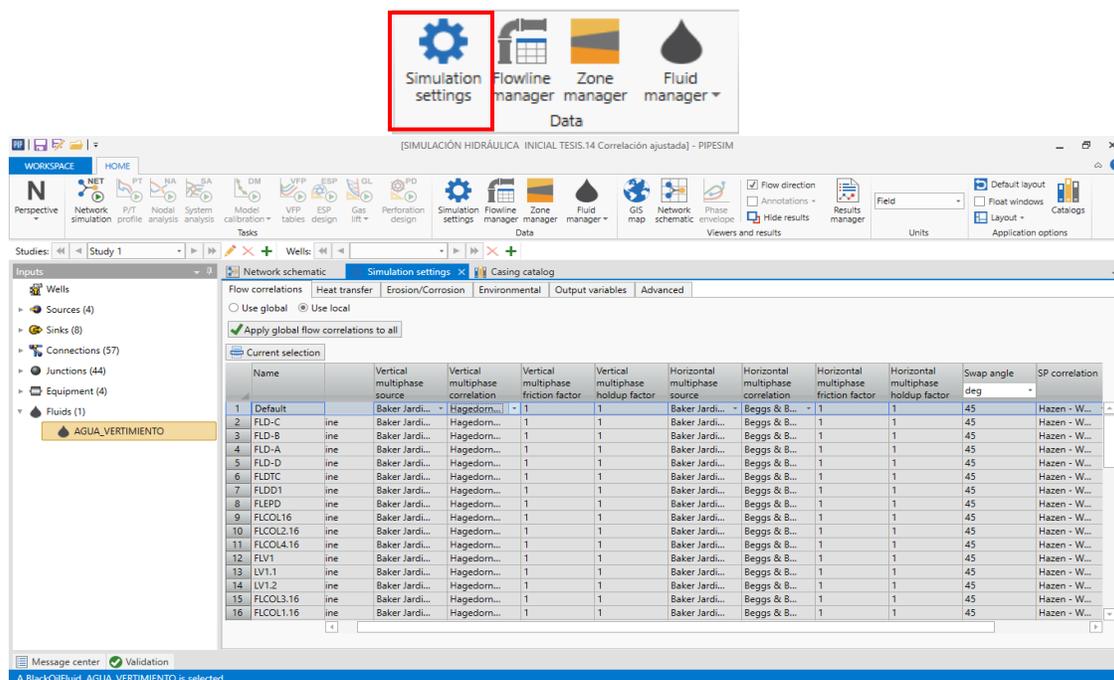
Nota. Esta figura muestra la ventana donde se define el modelo termal del fluido. Elaboración propia, interfaz PIPESIM.

2.4.1.b Configuraciones de la Simulación. En la sección de Configuraciones de la Simulación, se especificaron las correlaciones de flujo a utilizar para desarrollar la simulación, para este caso se especifican las siguientes correlaciones:

- **Vertical and Horizontal multiphase source:** La correlación de Baker Jardine.
- **Multiphase friction and hold Up Factor:** “Para flujo vertical y horizontal se considera un valor de 1. El valor definido por default del simulador es un factor de 1 para ambos para Friction y HoldUp” [10].
- **Vertical multiphase correlation:** Hangerdon and Brown
- **Horizontal multiphase correlation:** Beggs and Brill
- **Swap Angle:** “Establecido por default como 45°. Relacionando con las correlaciones de flujo, se utiliza la correlación de flujo vertical cuando el ángulo de la tubería es mayor a 45°, cuando el ángulo es menor a 45° se utiliza la respectiva correlación para flujo horizontal, de esta manera se obtiene una mejor caracterización del flujo” [10].
- **SP correlation:** Se utiliza la correlación de Hazen-Williams debido a que esta correlación se basa en la asunción de agua como fluido de proceso a 60°F, con flujo turbulento [1].

Figura 19.

Configuraciones de la simulación



Nota. Esta figura muestra la ventana donde se definen las configuraciones de la simulación.

Elaboración propia, interfaz PIPESIM.

En las demás opciones de configuración se mantuvieron los valores establecidos por default por el simulador, configuración de Transferencia de Calor, Erosión/Corrosión, Ambiental. En la sección de variables de salida se dejan por defecto todas las predeterminadas por el simulador, adicionalmente no se consideran configuraciones avanzadas para la simulación debido que no aplica el caso para ninguna de estas configuraciones.

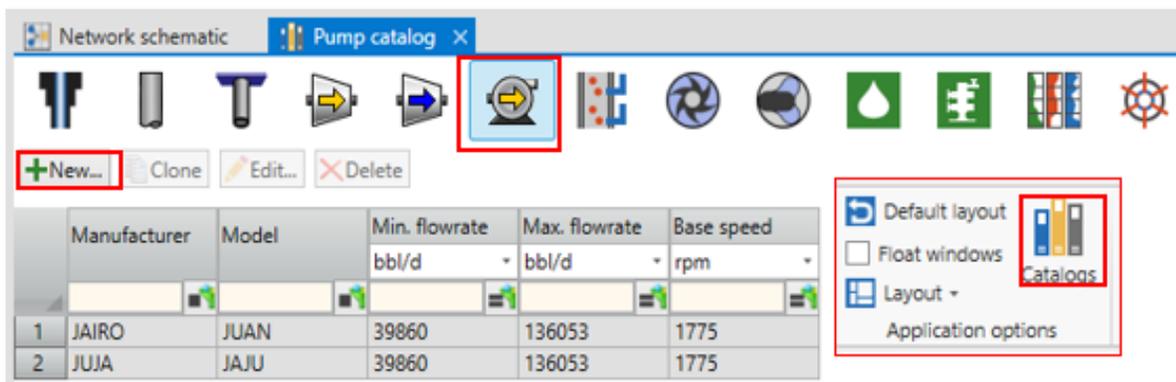
2.4.2 Creación de la Red de Superficie

La construcción del caso de simulación se elabora en el Work Space del simulador, donde se cuenta con la información del caso y todas las opciones de configuración para modificar según sea la necesidad. El tablero de trabajo se denomina Network schematic, espacio donde se insertarán todos los componentes para la construcción de la red de flujo.

2.4.2.a Creación de Unidad de Bombeo. Previamente a insertar los componentes de la red de flujo se construye el modelo de las bombas operativas, con las respectivas características mencionadas en el capítulo anterior. Esto, en la pestaña HOME de la barra de opciones en el Grupo APPLICATION OPTIONS en el ícono CATALOGS.

Figura 20.

Creación Bomba en Catálogo



Nota. Esta figura muestra las ventanas durante la creación de una Bomba en el Catálogo. Captura de pantalla de interfaz del simulador.

Al desplegarse el catálogo se elige el ícono de la bomba y se comienza a construir el modelo de bomba requerido para el caso base de la siguiente manera: Se selecciona en la pestaña de Nuevo, seguido de esto se despliega el cuadro **Bomba Genérica**.

En la pestaña de propiedades de la bomba se especificaron las siguientes propiedades de acuerdo con la información suministrada en el capítulo anterior; fabricante (JAIRO), Modelo (JUAN), Qmin (39860 bbl/d), Q max (136053 bbl/d), Velocidad (1775 rpm), Etapas (1).

Figura 21.
Datos de la Bomba

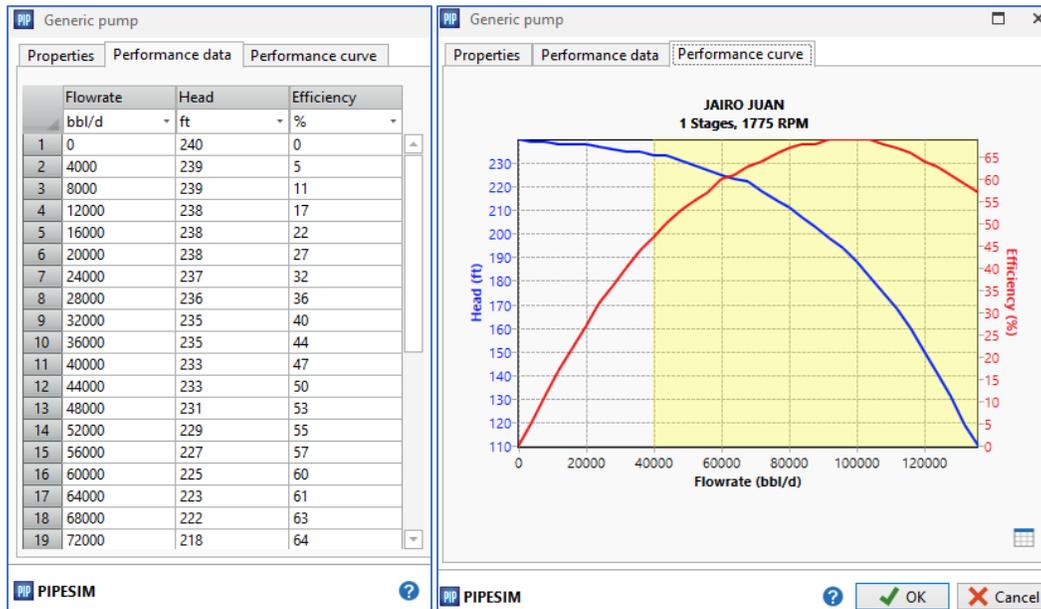
The image shows a software window titled "Generic pump" with three tabs: "Properties", "Performance data", and "Performance curve". The "Properties" tab is selected. Under the "GENERAL" section, there are input fields for: Manufacturer (JUJA), Model (JAJU), Min. flowrate (39860 bbl/d), Max. flowrate (136053 bbl/d), Base speed (1775 rpm), and Base stages (1). Below this is an "ALLOWED STAGES" section with a "Stage number" field and a "+" button. At the bottom of the window, there are buttons for "?", "OK", and "Cancel".

Nota. Esta figura muestra los datos de diseño de la Bomba.
Elaboración propia, interfaz PIPESIM.

En la tabla de condiciones operativas, se especifican los valores de caudal y cabeza (Columna estática de fluido), y la eficiencia de la bomba a dicho par de condiciones específicas, con esta información en la pestaña Curva operativa se puede visualizar la curva de la bomba.

Figura 22.

Datos de Rendimiento de la Bomba

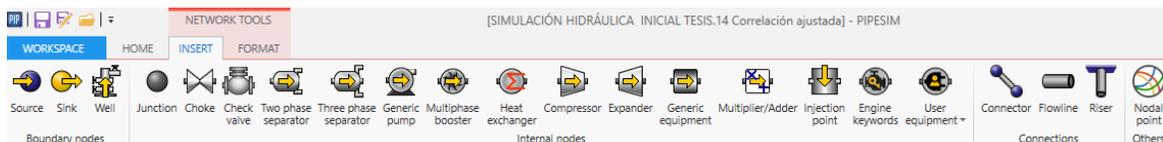


Nota. Esta figura muestra las ventanas durante la creación de una Bomba en el Catálogo. Elaboración propia, interfaz PIPESIM.

2.4.2.b Construcción de la red de superficie. Una vez creadas las unidades de bombeo en el catálogo se procede a construir la red de superficie del sistema de vertimiento, para esto se especifica el procedimiento utilizado para insertar cualquier elemento en la red de simulación; para hacerlo se selecciona la opción INSERT de la barra de herramientas de la sección NETWORK TOOLS. Se despliega una pestaña con los íconos de distintos equipos y accesorios (nodos iniciales y finales, conexiones y otros) que se pueden agregar para la construcción de la red.

Figura 23.

Pestaña de Herramientas para construir la Red



Nota. Esta figura muestra la barra de herramientas para la creación de la red de superficie. Elaboración propia, interfaz PIPESIM.

A continuación, se presenta una tabla en la cual se listan los elementos utilizados para la construcción de la simulación:

Tabla 12.

Elementos de la red de superficie

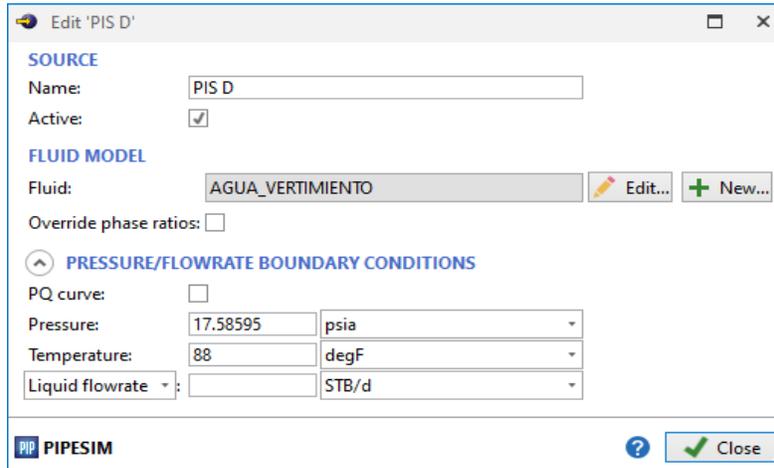
ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
 <p>Source</p>	<p>Nodo límite inicial, es utilizado para representar el punto en el cual el fluido modelado entra a la red.</p>
 <p>Sink</p>	<p>Nodo límite final, es utilizado para representar el punto en el cual el fluido deja el sistema.</p>
 <p>Junction</p>	<p>La unión es el nodo utilizado simplemente para conectar ramales de la red de flujo. No tiene características de caídas de presión asociadas.</p>
 <p>Generic pump</p>	<p>El modelo de bomba del simulador utiliza ecuaciones de bombas centrífugas para determinar relaciones de presión de descarga, cauda, propiedades mecánicas de las bombas.</p>
 <p>Connector</p>	<p>El conector es utilizado para conectar dos equipos entre los cuales no existen cambios de presión ni temperatura significativos.</p>
 <p>Flowline</p>	<p>La línea de flujo permite representar los tendidos de tubería de una red superficial, tiene las propiedades físicas de las tuberías como; sch, espesor, rugosidad, se puede definir la elevación entre puntos entre otras propiedades.</p>

Nota. Esta tabla muestra las herramientas para la creación de la red de superficie. Elaboración propia, interfaz PIPESIM.

Teniendo en cuenta que el sistema de vertimiento cuenta con cuatro unidades de transferencia de fluido hacia vertimiento, se deben definir cuatro Nodos iniciales, los cuales representan en este caso puntual la Piscina De Vertimiento, la cual se encuentra a las siguientes condiciones, las cuales fueron suministradas por la compañía. Estos nodos deben diseñarse con el modelo de fluido establecido “AGUA_VERTIMIENTO”, teniendo una presión de 2,89 Psig y una temperatura de 88°F. Sin flujo debido a que es la succión de las bombas.

Figura 24.

Pestaña de edición Sources

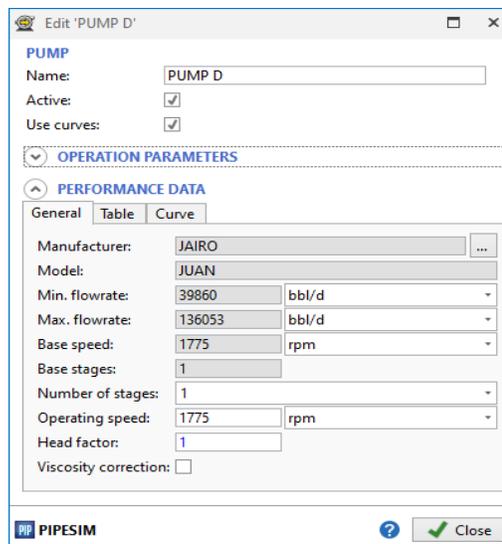


Nota. Esta figura muestra la ventana de edición de los Sources. Elaboración propia, interfaz PIPESIM.

Una vez se han definido los 4 nodos iniciales se deben agregar las 4 unidades de transferencia correspondientes en el Workspace, Network Schematic, se agrega la bomba creada previamente en el catálogo y se especifica la velocidad de operación.

Figura 25.

Pestaña de Unidades de Bombeo



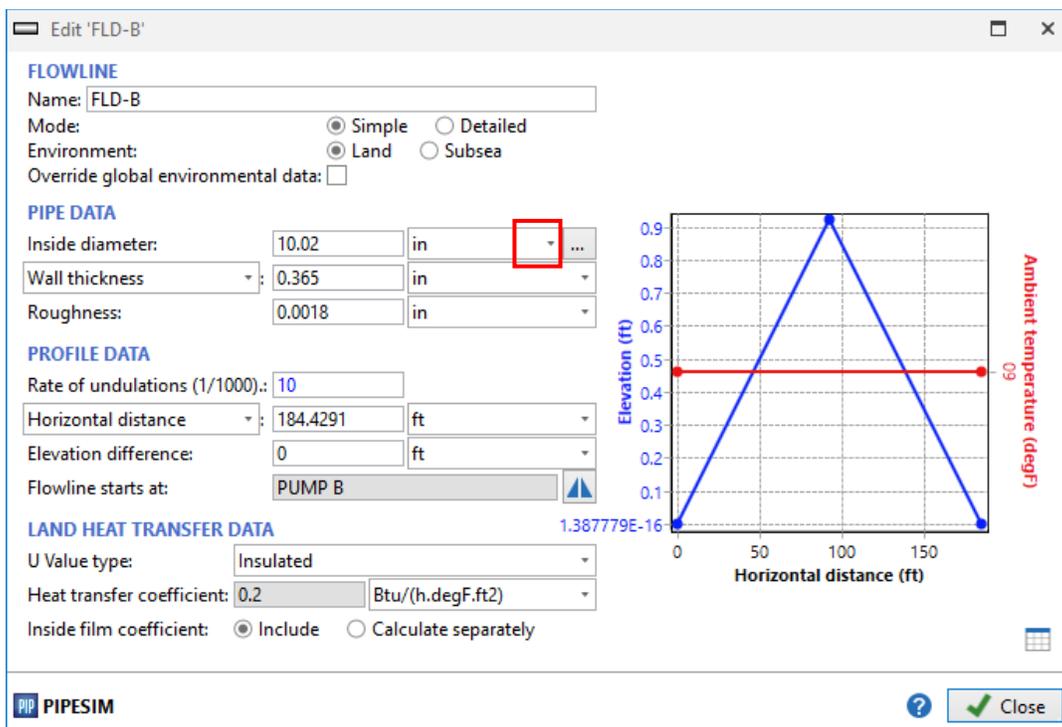
Nota. Esta figura muestra la ventana de edición de las bombas. Elaboración propia, interfaz PIPESIM.

En este caso no se definen parámetros operativos debido a que el objetivo es representar las condiciones actuales del sistema de vertimiento por lo cual se especifica únicamente el performance de la bomba, y se pone como condición el caudal de descarga que debería haber en cada uno de los puntos de vertimiento.

Se debe utilizar un conector para relacionar el nodo inicial con su respectiva unidad de bombeo. Posterior a esto se agregan las líneas de flujo, para cada línea de flujo se especifica su nombre, el modo de modelado de la línea sea simple o detallad, se especifica el ambiente en que se encuentra, información de las propiedades de la tubería; diámetro, espesor y rugosidad, se puede establecer el tipo de tubería en el catálogo de tuberías accediendo en la cinta de opciones disponible en la etiqueta de diámetro interno, en el catálogo se pueden especificar el tipo de tubería, peso nominal, SCH, entre otras propiedades.

Figura 26.

Pestaña de Herramientas para construir la Red



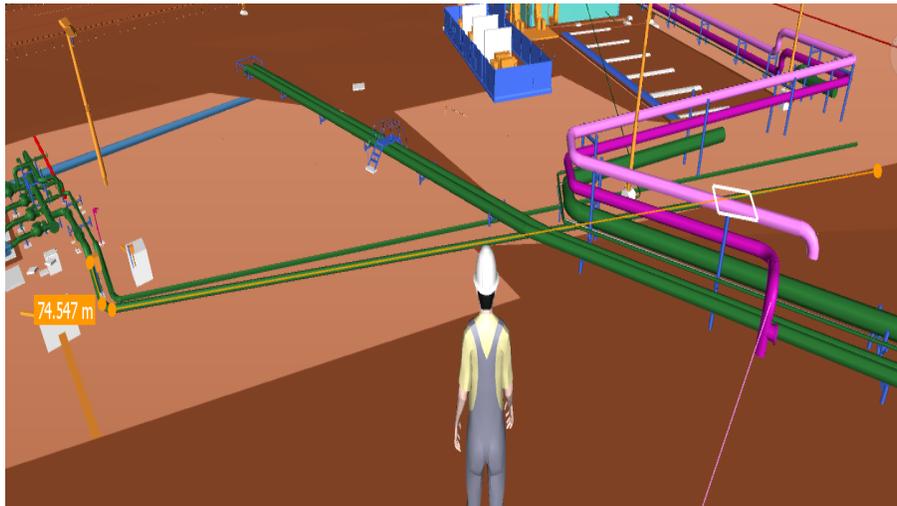
Nota. Esta figura muestra la ventana de edición de los Sources. Elaboración propia, interfaz PIPESIM

Las pérdidas de presión ocasionadas por los accesorios deben ser expresadas en términos de longitudes equivalentes. La información del tendido de tubería se divide en 2 secciones, la primera cubre la información de las líneas de las descargas de las bombas; línea hacia VA, línea hacia VB y la línea hacia VC, VD y VE, hasta los límites de la PLANTA-A. Esta información se extrae de la maqueta digital a escala de la planta, la cual permite hacer mediciones exactas de las líneas de flujo. La medición de las líneas de descarga a vertimiento se hace tramo a tramo, siendo registrado cada uno de ellos y los accesorios que la conectan para posteriormente ser convertidos a longitud equivalente y hacer la suma de longitudes para ser representado por una única línea de flujo de un solo ramal de tubería.

La segunda sección del tendido de tubería que cubre todo a partir de los límites de la PLANTA-A hasta cada uno de los puntos de vertimiento, estas mediciones fueron suministradas por la COMPAÑÍA, debido a que cuenta con información de perfiles de elevación, perdidas representadas con longitudes equivalentes.

Figura 27.

Maqueta a escala Planta A

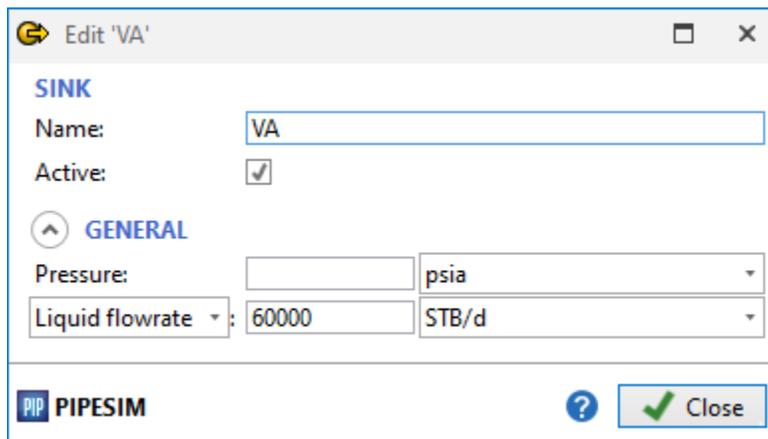


Nota. Esta figura muestra la maqueta a escala de la cual fueron extraídas las medidas y dimensiones de la tubería de descarga al vertimiento, dentro de la Planta A. Tomado de: Maqueta Ecopetrol.

Finalmente, en cada nodo límite final tal como los puntos de vertimiento o bridas ciegas dentro del sistema, se pone un Sink, al cual se debe especificar las condiciones de presión y flujo a la salida del nodo. Para este caso específico se especificará únicamente el caudal esperado en cada uno de los puntos de vertimiento, debido a que estamos buscando las condiciones operacionales actuales del sistema.

Figura 28.

Configuración de Sinks



Nota. Esta figura muestra los parámetros a especificar en la configuración de los Sink Tomado de: Maqueta Ecopetrol.

2.4.3 Corridas y Ajustes del Modelo de Simulación

Una vez construida la red de superficie se debe hacer la corrida inicial para identificar las condiciones de operación ideales respecto a las obtenidas de acuerdo con las configuraciones establecidas en el modelo de simulación. De acuerdo con los resultados que se obtengan en las variables de control de proceso, presión de descarga y caudal se determinará si el sistema de vertimiento está bien dimensionado, según sean estos resultados se podrá inferir si el sistema de vertimiento cumple o no con los requerimientos para verter la capacidad de diseño del actual sistema de vertimiento.

Una vez identificados los resultados obtenidos, se deben hacer los respectivos ajustes. Para el caso en el cual no se cumpla la capacidad de vertimiento, se deben identificar las variables que podrían estar afectando el dimensionamiento del sistema y se deberá

ajustar el modelo para que se cumpla con la capacidad de vertimiento diseñada. Por otro lado, si el modelo cumple con la capacidad de vertimiento se debe realizar un nuevo caso en el cual se ajuste el modelo a las condiciones actuales del sistema de vertimiento, es decir a la pérdida de capacidad volumétrica, un caso que represente las mismas características de operación de las pruebas del sistema de bombeo realizadas en campo. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el modelo ajustado y los obtenidos en las pruebas en campo se podrá identificar el origen de la posible pérdida de eficiencia en el sistema de vertimiento, esto mediante una comparación de pérdidas de presión en los nodos en los cuales fue medida la variable.

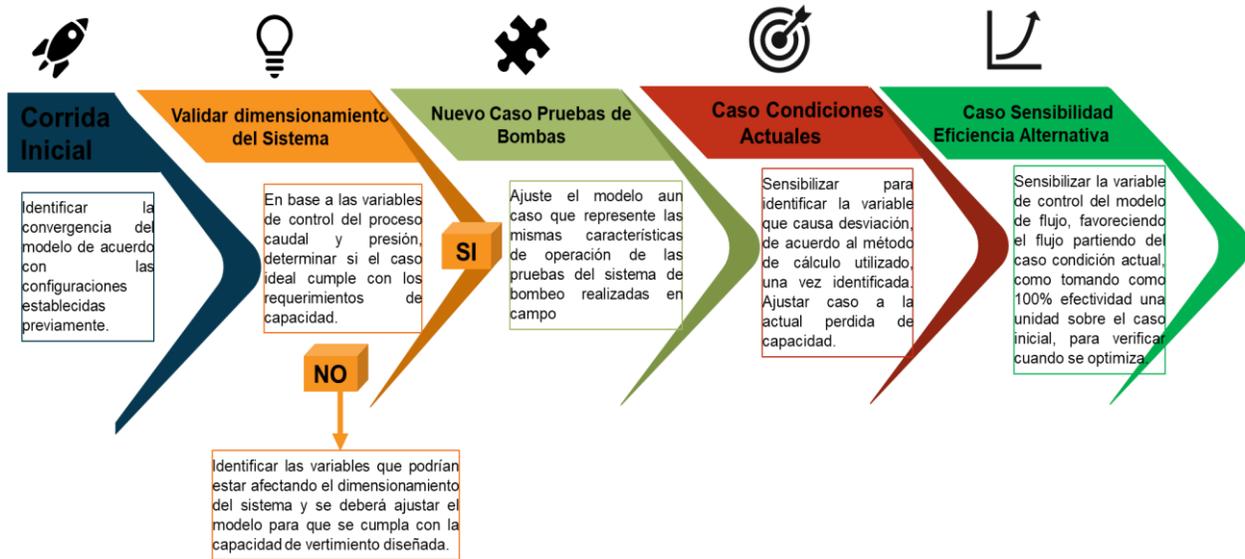
Posteriormente debe realizar una sensibilidad mediante la cual se identifique la variable que hace que el modelo de simulación no se comporte de manera real sino de forma ideal. Se identifica según el método de cálculo configurado en la simulación para los cálculos de presión y flujo, para el caso de este trabajo puntual Hazen-Williams. Una vez determinada la variable de control del método de cálculo debe ser cambiado hasta conseguir resultados que representen las condiciones actuales del sistema de vertimiento.

Finalmente se deberá representar la efectividad de la alternativa mencionada a partir de la sensibilización de la variable de control del modelo de flujo representado por la correlación de Hazen Williams, para identificar si mediante la implementación de la alternativa mencionada se consigue optimizar el sistema de vertimiento a los 300KBWPD. Estas sensibilidades deben ser representadas en un caso de simulación, y deben mostrarse hasta que se cumpla la capacidad del sistema de vertimiento partiendo del caso de simulación actual, hasta que se cumpla el volumen requerido en cada uno de los 5 puntos de vertimiento.

Según la metodología anterior se podrá definir la causa real de la pérdida de eficiencia del sistema de vertimiento, en base a las cual se plantearán las alternativas para la optimización del mismo. Probablemente la causa raíz esté relacionada con obstrucciones en la línea que ocasionan pérdidas de presión por fricción adicionales en los tramos de la línea.

Figura 29.

Diagrama de flujo Metodología Corridas y Ajustes del Modelo de Simulación



Nota. El diagrama de flujo de la metodología para la corrida y ajustes de la simulación.

2.5 Análisis de alternativas para la limpieza y remoción de obstrucciones en las líneas de vertimiento

Siguiendo la línea de flujo, de acuerdo con el apartado anterior, se requieren identificar las alternativas que permitan reestablecer la capacidad de flujo del sistema de vertimiento, removiendo la mayor cantidad posible de material que se encuentre generando pérdidas de presión adicionales en el sistema de vertimiento, desde la descarga de las bombas hasta el cabezal de distribución hacia los vertimientos C, D y E. Cada una de las alternativas será definida y puesta en contexto con el caso de estudio del sistema de vertimiento estableciendo los requerimientos para su aplicación, para posteriormente elegir la mejor opción y crear un plan de acción para el desarrollo de la misma y alcanzar el re establecimiento del sistema de vertimiento. A continuación, se numeran las alternativas planteadas.

2.5.1 Limpieza Química

Para identificar el producto de tratamiento químico para la remoción de las posibles obstrucciones, se requiere tener un análisis fisicoquímico de las propiedades del agua a la entrada al sistema de vertimiento y a la salida donde se identifiquen la concentración de cada uno de los componentes para identificar que se está incrustando o precipitando y así de esta manera determinar un producto que permita disolver y remover la obstrucción en la línea. Se cuenta con la composición físico-química del agua a la salida de la PIS-ASPER, donde puede identificar que la concentración de grasas y aceites, solidos suspendidos y la demanda química de oxígeno es reducida considerablemente respecto a los procesos de tratamiento de agua aguas arriba de la PIS-ASPER.

Figura 30.

Parámetros Físico-Químicos Agua de Vertimiento

PARAMETROS	MÉTODO	UNIDADES	FWKO	PIS-VER	PIS-VER
Cloruros	SM-4500 Cl-	mg/L	NA	200	NA
Dureza Total	SM-2340 C	mg/L	NA	24	NA
Dureza Calcica	SM-2340 C	mg/L	NA	12	NA
DBO5	Calculo	mg/L	NA	8,1	NA
DQO	SM-5220 D	mg/L	1368	13,0	99,05
Grasas y Aceites	HACH	mg/L	961	0,10	99,99
Oxigeno Disuelto	SM-4500 O- B	mg/L	NA	6,4	NA
pH	SM-4500B H+	Unidad	NA	8,29	NA
Sólidos Suspendido	SM-2540 D	mg/L	426	1,0	99,77
Sólidos sedimentab	SM-2540 F	mg/L	NA	<0,1	NA
Turbidez	SM-2130 B	NTU	572	0,31	99,95
Temperatura	SM-2550 B	°C	NA	30,1	NA
TPH	NTC 3362-7f	mg/L	NA	-	NA
Conductividad	SM-2510 B	µS/cm	NA	1552	NA
Sulfatos	SM-4500 SO4 E	mg/L	NA	3,07	NA
Acidez Total	SM-2310B	mg/L	NA	0	NA
Alcalinidad Total	SM-2320B	mg/L	NA	516	NA
Hierro	HACH	mg/L	NA	0,07	NA
TDS	SM-2540 C	mg/L	NA	930	NA

Nota. Esta figura muestra los parámetros Físicoquímicos del Agua de Vertimiento a considerar para la selección del producto de tratamiento.

Adicionalmente se cuenta con los parámetros establecidos que se deben cumplir previamente a la disposición final de aguas residuales industriales tratadas en el Caño Rubiales.

Figura 31.

Parámetros Físico-Químicos Licencia Ambiental

<u>PARÁMETRO</u>	<u>UNIDADES</u>	<u>VALOR MAXIMO PERMITIDO</u>
<u>Hidrocarburos</u>	<u>(mg/l)</u>	<u>1.0</u>
<u>Cloruros</u>	<u>(mg/l)</u>	<u>250</u>
<u>DQO</u>	<u>(mg/l)</u>	<u>45</u>
<u>Oxigeno disuelto</u>	<u>(mg/l)</u>	<u>Mínimo 6.0</u>
<u>Dureza Total</u>	<u>(mg/l)</u>	<u>118</u>
<u>Coliformes Fecales</u>	<u>NMP/100ml</u>	<u>500</u>
<u>Coliformes Totales</u>	<u>NMP/100ml</u>	<u>1000</u>

Nota. Esta figura muestra los parámetros Físicoquímicos del Agua de Vertimiento. Tomado de: Portal ANLA "RESOLUCIÓN NÚMERO (2355) 24 de diciembre de 2007". [En Línea]. Disponible en: http://portal.anla.gov.co/sites/default/files/13147_res_0836_250714.pdf. [Acceso: Abril, 2021].

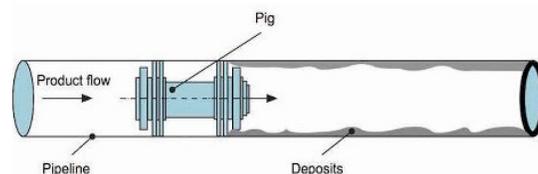
Una vez determinado el producto químico a utilizar, el cual será pre seleccionado en base la determinación de las probables precipitaciones respecto a la composición físico-química del agua y parámetros controlados, se procede a mencionar los requerimientos para llevar a cabo la operación de la limpieza química. Se mencionarán los aspectos logísticos y de planeación calificar la alternativa para hacer una selección.

2.5.2 Limpieza Mecánica

De acuerdo con lo mencionado anteriormente y las características del caso de estudio del sistema de vertimiento, para la limpieza mecánica se debe escoger el tipo de raspador adecuado para hacer las corridas de limpieza. Es importante tener en cuenta que la selección del raspador debe coincidir con las condiciones operativas a las que se enfrentará en la limpieza del sistema de vertimiento; tubería de transporte de agua, separación y evacuación de productos, limpieza y remoción de sólidos. Se debe determinar cuál es el mecanismo de recepción del raspador más apropiado en base a los recursos y facilidades disponibles, dicha selección se trabajará en base al comisionamiento de facilidades disponibles y a la revisión teórica-histórica de aplicaciones comunes y exitosas llevadas a cabo en contextos similares al del caso del sistema de vertimiento de campo rubiales. Las características principales a tener en cuenta es que la limpieza se llevará a cabo en la bifurcación, que tiene una se compone de una línea de 12” y otra de 14”, ambas con una longitud de 2147 m. Una vez determinados esto dos aspectos principales, Se mencionarán los aspectos logísticos y de planeación calificar la alternativa para hacer una selección.

Figura 32.

Limpieza Mecánica Hidráulica de Tubería



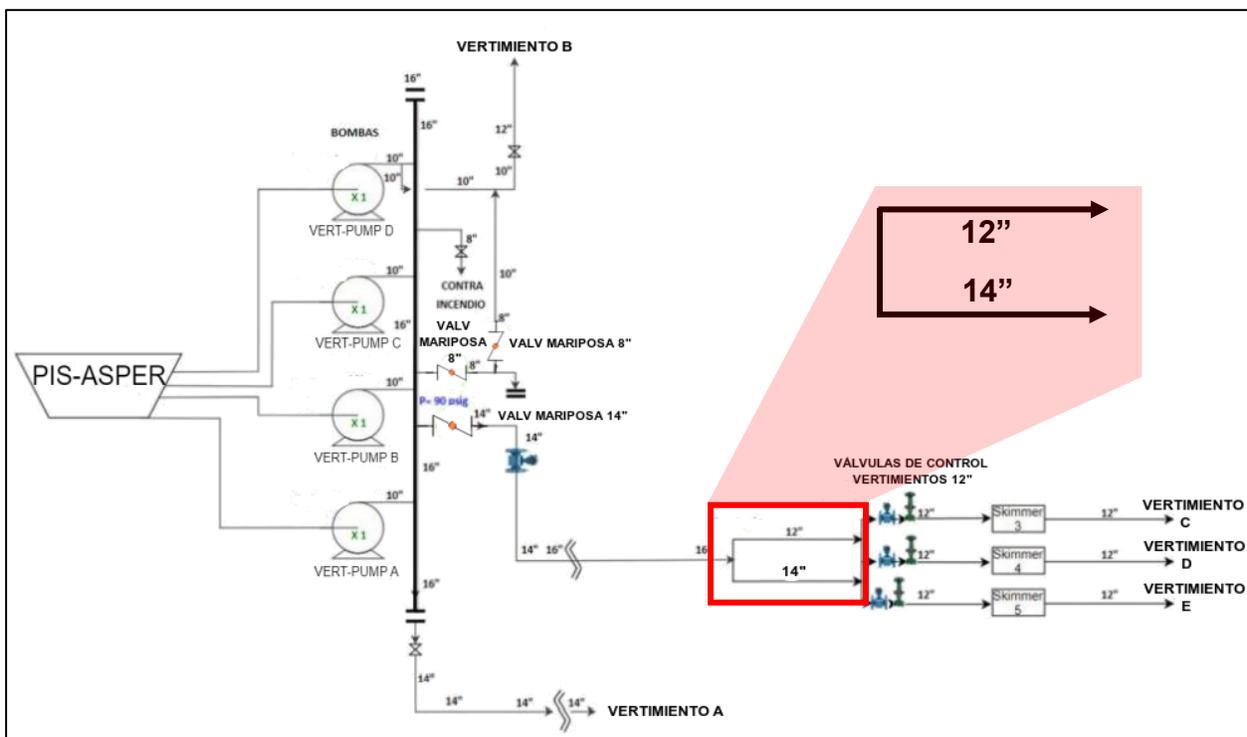
Nota. Descripción de la alternativa de Limpieza Mecánica mencionada. Tomado de: Control Engineering “*Dirty pipelines decrease flow, production—pig your line*” [En línea]. <https://www.controleng.com/articles/dirty-pipelines-decrease-flow-production-pig-your-line/> [Acceso: Abril, 2021].

2.5.3 Cambio de los tramos de línea de la Bifurcación de 12" y 14"

Como última alternativa se plantea el cambio de las dos líneas que van desde la bifurcación, una de 14in y otra de 12in con 2.147 metros hasta el cabezal de descarga donde se divide en tres líneas de 12in para descargar a los tres puntos de vertimiento VC, VD y VE como se muestra a continuación en el cuadro resaltado.

Figura 33.

Tramo de línea de la Bifurcación



Nota. Esta figura muestra las tuberías que se proponen cambiar para la optimización del vertimiento. Elaboración propia, plantilla Instructivo EGP-I-167.

De acuerdo con el anterior diagrama de proceso, y teniendo claro donde se llevaría a cabo la posible alternativa, se deben mencionar los criterios de diseño y selección de tuberías ajustados a los requerimientos del sistema de vertimiento. Se mencionarán los aspectos logísticos y de planeación calificar la alternativa para hacer una selección.

2.5.4 Selección de la Alternativa de Limpieza

Teniendo en cuenta los escenarios expuestos anteriormente, se plantea una metodología para la selección de la mejor alternativa en base a la evaluación del riesgo asociado a la implementación de cada alternativa, la cual fue diseñada a partir de la *Matriz de Valoración de Riesgos* formato elaborado en 25 de Mayo de 2016, documento que es propiedad de Ecopetrol SA, que considera cómo bases para la evaluación del riesgo, la gravedad de los eventos relacionados a cada categoría de evaluación, la frecuencia de ocurrencia de estos eventos de acuerdo con la historia y la probabilidad de ocurrencia del evento, la cual es calificada en un rasgo cualitativo; muy alto, alto, medio y bajo.

La metodología planteada consiste en la calificación de las tres alternativas mencionadas en cuatro criterios principalmente; el impacto que puede generar a trabajadores y al ambiente, el valor estimado de inversión, incertidumbre asociada a la efectividad de las actividades, y facilidad de implementación de cada una de las alternativas.

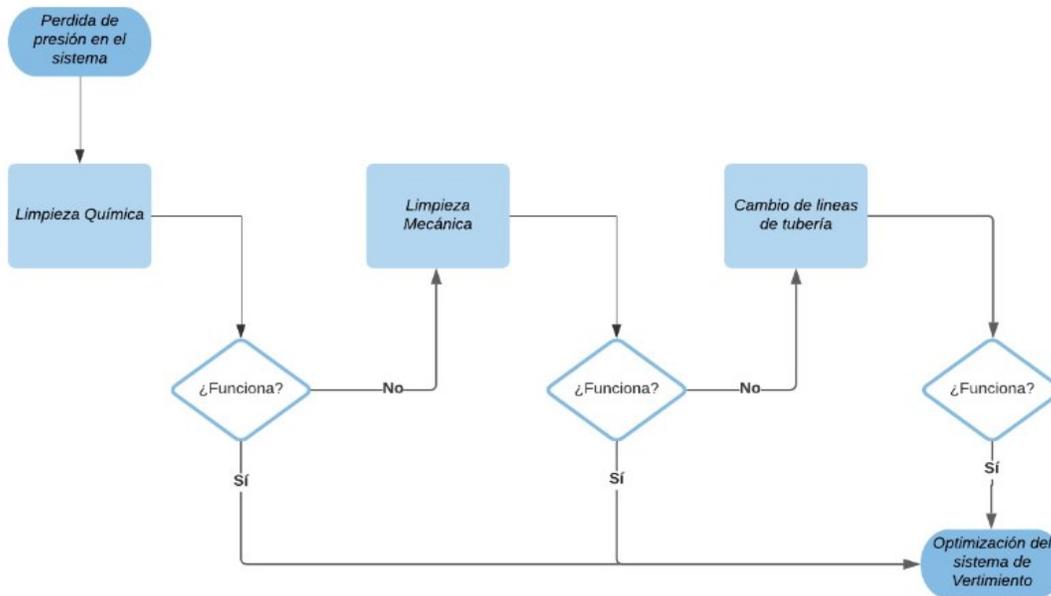
Se emplea una calificación cuantitativa donde se divide en 3 niveles de riesgo asociados a cada una de las variables que se tienen estipuladas para la valoración de las alternativas, esta metodología contribuye a la toma de decisión de la alternativa más adecuada para la optimización, dichos niveles se dividen en riesgo Bajo con una calificación numérica de 1, riesgo Medio con una calificación numérica de 5 y finalmente riesgo Alto con una calificación numérica de 10, este riesgo se estipula con base a información preexistente y al escenario más probable dependiendo el parámetro que se está evaluando, y el rango de calificación del riesgo se diseña de manera cuantitativa en base a la evaluación del riesgo de la matriz, estableciendo un rango numérico en el cual se ubique el valor de la sumatoria de las calificaciones para cada parámetro en cada una de las alternativas, estableciendo los rangos bajo y medio como el doble de la sumatoria de la evaluación si todos los parámetros fueran bajos o medios. Lo importante es tener un sistema para el manejo del riesgo ante la implementación del proyecto.

Es importante tener en cuenta que estos rangos han sido establecidos de acuerdo al caso en evaluación particular, por lo cual los resultados obtenidos de esta metodología pertenecerán al caso de estudio particular.

Una vez se hayan obtenido los resultados de la evaluación de las alternativas, se plantea un árbol de decisión el cual será utilizado en el caso en que los resultados obtenidos para cada alternativa determinen que las tres alternativas planteadas no son excluyentes entre sí, y que por dicha razón se debería ejecutar siguiendo la secuencia del ensayo con cada una de las alternativas. Es importante aclarar que el objetivo de este árbol de decisión es brindar un flujo de trabajo en caso que se decidan ejecutar todas las alternativas para garantizar la optimización del sistema.

Figura 34.

Árbol de decisión de las alternativas



Nota. Esta figura muestra el árbol de decisión de las alternativas planteadas.

Figura 35.

Rango de Evaluación de Alternativas

RIESGO		
Bajo	1	30
Medio	31	60
Alto	>60	

Nota. Esta figura muestra los rangos de evaluación para las alternativas planteadas

Tabla 13.

Tabla de Criterios de Selección

Parámetros	RIESGO			ALTERNATIVAS		
	BAJO	MEDIO	ALTO	QUÍMICA	MECÁNICA	CAMBIO DE TUBERÍA
FACILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN	1	5	10			
Equipos disponibles para la implementación	Se tienen todos los equipos requeridos para la operación	Se tienen algunos de los equipos requeridos para la operación	No se cuenta con ningún equipo requerido para la alternativa.			
Logística	Movilización de suministros rápida y disponibilidad inmediata. Planeación por operaciones. SIMOPS	Movilización de suministros media y disponibilidad por solicitud y orden de compra. Planeación por ingeniería. No actividades simultáneas	Movilización de suministros lenta y planeación externa, obras civiles y requerimientos de MOC para continuar operación.			
Riesgo de integridad	La alternativa no representa un riesgo asociado a la integridad de los equipos y al aseguramiento de flujo	La alternativa si representa riesgo para la integridad equipos y al aseguramiento de flujo	La alternativa representa un alto riesgo para la integridad de los equipos y el aseguramiento de flujo			
Tiempo de implementación	De 1 a 5 días	Entre 5 y 15 días	Más de 30 días			
COSTOS	1	5	10			
Inversión Capex	0 - 500.000 USD	500.000 - 2'500.000 USD	Más de 2'500.000 USD			
Inversión Opex	0 - 500.000 USD	500.000 - 2'500.000 USD	Más de 2'500.000 USD			
INCERTIDUMBRE	1	5	10			
Frecuencia de Implementación	Se ha hecho más de 5 veces	Se ha hecho al menos una vez	No se ha hecho nunca			
Resultados de Implementación previa.	Funcionó cuando se implementó	No se ha evaluado los resultados	No funcionó cuando se implementó			
Eficiencia de remoción de obstrucciones dentro de la tubería	Alta certeza de eficiencia de acuerdo a las condiciones del caso	Media certeza de eficiencia de acuerdo a las condiciones del caso	Baja certeza de eficiencia de acuerdo a las condiciones del caso			
IMPACTO	1	5	10			
Daño a personas	Lesiones leves, golpes o moretones	Incapacidad temporal	Incapacidad permanente			
Afectación ambiental	Uso de suelos, ruido, emisiones	Pérdida de contención controlable	Pérdida de contención, cambio de propiedades fisicoquímicas del ambiente.			
Reputación	Quejas o reclamos	No conseguir resultados oportunamente, interrumpiendo las operaciones.	Perdida de confianza debido a incidentes operacionales o ambientales			
TOTAL				0	0	0

Nota. Esta tabla muestra la evaluación de cada uno de los criterios de selección establecidos previamente.

3 . RESULTADOS Y ANÁLISIS.

En este capítulo se mostrará el resultado obtenido una vez se ha finalizado la construcción de la red de superficie que representa el sistema de vertimiento de Campo Rubiales en el simulador. Se identificarán los resultados obtenidos del proceso de simulación y corrida inicial de acuerdo con las variables establecidas y configuraciones realizadas en base a la metodología establecida en el capítulo anterior. Se realizarán la validación de datos con su respectivo análisis y justificación. A demás, se realizarán las respectivas sensibilidades y análisis para la elaboración de los casos de simulación que representen las pruebas suministradas y las condiciones actuales del sistema, para finalmente confirmar la causa raíz de la pérdida de capacidad del sistema de vertimiento.

Se mostrarán los requerimientos y aplicaciones de las tres alternativas planteadas para la optimización y limpieza del sistema de vertimiento, bajo las cuales se definió cual era la mejor alternativa planteada para la optimización. Posteriormente se lleva a cabo la evaluación mediante la metodología establecida en el capítulo anterior. Hecha la elección se mostrará el desarrollo de la alternativa con menor puntaje de riesgo, y posteriormente se muestra el análisis económico de la alternativa desarrollada.

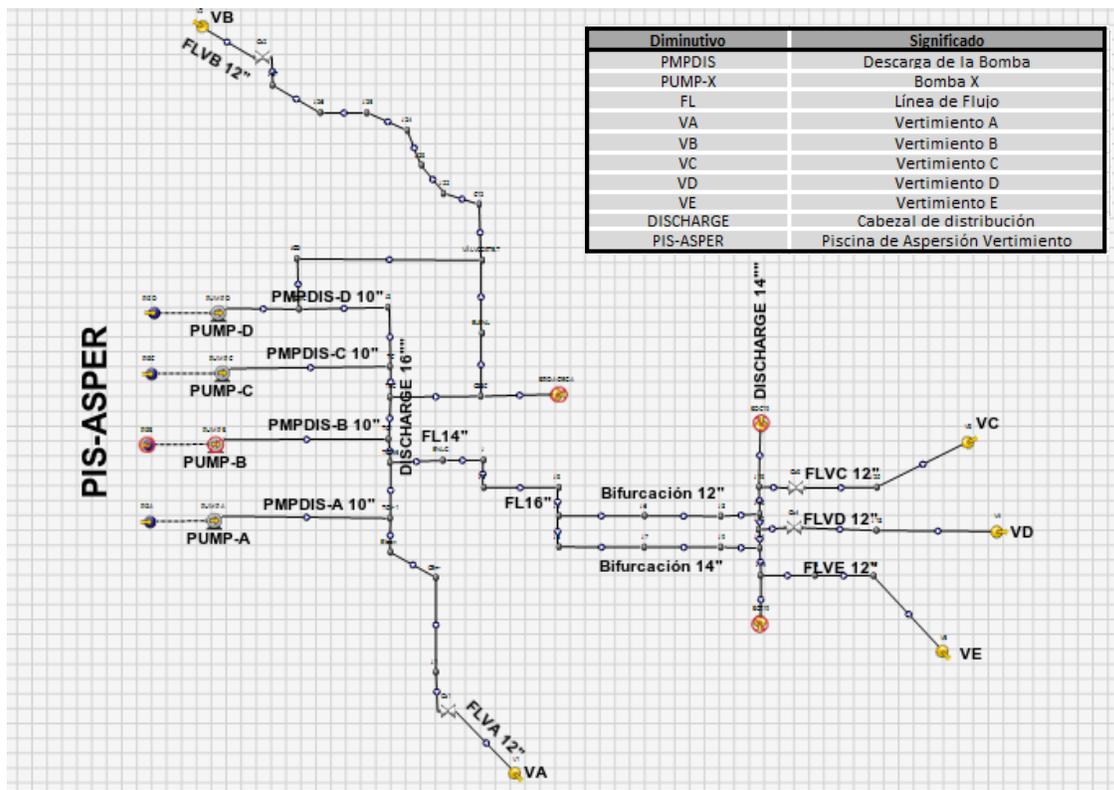
3.1 Resultados del caso de simulación

Según los pasos recomendados en la metodología para la construcción de caso de simulación, al finalizar la red de superficie se obtuvo el esquema, el cual representa el actual Sistema de vertimiento, con sus respectivos 5 puntos de vertimiento, y todos los tramos de línea de acuerdo a sus características de diseño y datos mencionados en el capítulo de datos y metodología.

Adicionalmente se obtiene convergencia en la todas las corridas, la inicial se obtiene convergencia en el resultado en la iteración #4, con un tiempo de cálculo de 1.03m y un porcentaje de error de $10 \text{ E-}3$, de acuerdo con las condiciones de frontera establecidas.

Figura 36.

Red de Superficie construida



Nota. Esta figura muestra le Network Schematic elaborado para la construcción del caso de simulación del sistema de vertimiento de Campo Rubiales.

Figura 37.

Iteraciones Red de Superficie construida

```

Network simulation | Engine console | Node/Branch results | Profile results
Iteration 4 P error : 0.30 %, F error : 0.00 %, L error : 0.00 %
Warning 26007903 from PNET_3 : Branch V1: branch error is significant (13.41924%)
Warning 26007903 from PNET_3 : Branch V2: branch error is significant (14.99061%)

Converged.
... network converged at iteration 4, final rms error : 0.296205E-02

Elapsed time:
Network Executive      1.79
PIPESIM sub-tasks     0.00
-----
Total                  1.79

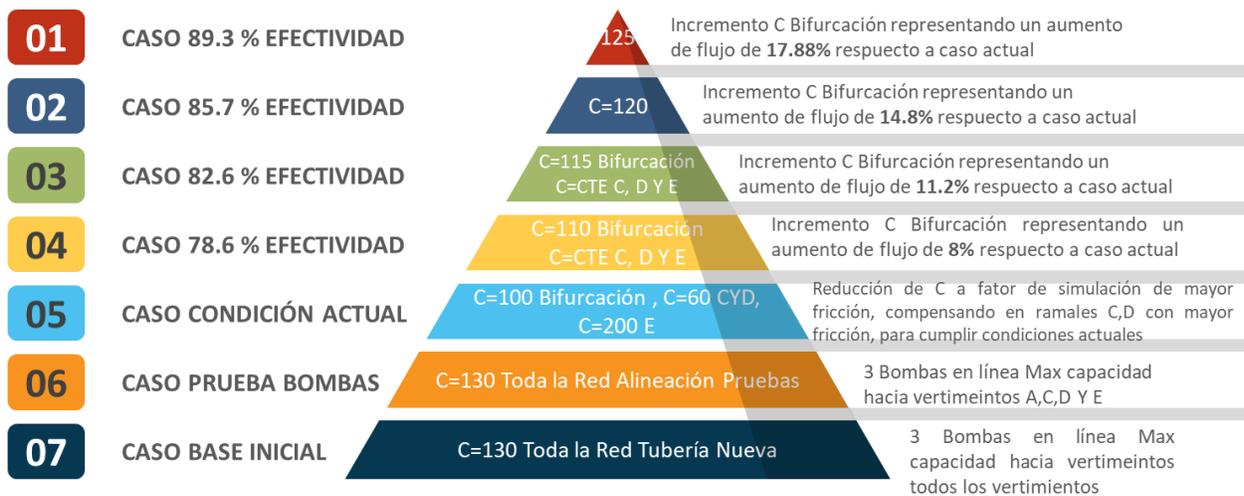
CPU time:
User task              0.70
System                 0.33
-----
Total                  1.03
Dispacing communication agent
    
```

Nota. Esta figura muestra la información de los resultados de la consola al correr la simulación. Captura de Pantalla Engine Console.

Para la ilustración de cada uno de los casos de simulación desarrollados para conseguir identificar la optimización del sistema de vertimiento a 300KBWPD, se establece el siguiente diagrama donde se establecen las características de cada uno de los casos de simulación.

Figura 38.

Descripción Casos de Simulación Construidos



Nota. Esta figura muestra la información de los casos desarrollados para cumplir los objetivos de optimizar la capacidad volumétrica identificando la variación entre cada uno de los casos.

Es importante tener en cuenta que los casos de simulación de efectividad fueron evaluados respecto al caso que representa las condiciones actuales, a partir de la variación en el parámetro de control del modelo de flujo de fase simple “C”, representado por la correlación de Hazen-Williams. Donde la efectividad de la alternativa es evaluada respecto a la comparación de dicho parámetro de control del modelo de flujo.

3.1.1 Corrida Inicial

De acuerdo con las configuraciones seleccionadas y la red de superficie construida, se hace la corrida inicial, donde se obtuvieron los resultados relacionados en la siguiente figura. El factor de fase simple o “c” predeterminado utilizado por el simulador para la correlación de fase simple de Hazen Williams es de 130, equivalente al valor promedio para tuberías nuevas o en buen estado.

Figura 39.

Resultados Corrida Inicial

	Name	Type	Pressure (out) psig	Temperatur... degF	ST liquid rate STB/d
5	PUMP A	Generic pump	85.7889	87.86682	99458.51
6	PUMP C	Generic pump	85.84268	87.86673	99388.16
7	PUMP D	Generic pump	84.65037	87.86865	101153.3
8	C8BC	Junction	82.12634	87.8408	1626.366
9	J 10	Junction	38.67181	87.88891	78971.41
10	J 11	Junction	38.67282	87.90391	101028.6
11	J 12	Junction	38.6715	87.89904	60000
12	J 13	Junction	38.6692	87.88885	60000
13	J 14	Junction	38.67022	87.90385	60000
22	VA	Sink	70.00102	87.8222	60000
23	VB	Sink	67.19177	87.87382	60000
24	VC	Sink	33.4407	87.89548	60000
25	VD	Sink	30.41222	87.9103	60000
26	VE	Sink	17.44566	87.88486	60000

Nota. Esta figura muestra los resultados obtenidos en la corrida inicial, donde se puede evidencia que, de acuerdo con las consideraciones y la información de entrada, se cumple con la capacidad de vertimiento. Elaboración propia, captura interfaz PIPESIM.

Según las menciones anteriores y los resultados obtenidos en el modelo que representa las condiciones ideales del sistema de vertimiento, en el cual el factor de fase simple representa una tubería en buen estado, se puede ver que el dimensionamiento del sistema es acertado, ya que en los cinco puntos de vertimiento se consiguen los 60 KBWPD de requerimiento.

3.1.2 Representación Prueba de Bombas

De acuerdo con las pruebas de las bombas A, C Y D alineadas a los puntos de vertimiento A, C, D y E, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 14.

Resumen pruebas de unidades de Bombeo

P-A		P-C		P-D		PG-CD
CAUDAL	P DESCARGA	CAUDAL	P DESCARGA	CAUDAL	P DESCARGA	
195000	97,87	195000	97,87	195000	97,87	22
194700	98,12	194700	98,12	194700	98,12	22
197500	97,64	197500	97,64	197500	97,64	22
197000	97,66	197000	97,66	197000	97,66	22
199900	97,28	199900	97,28	199900	97,28	22
209800	96,3	209800	96,3	209800	96,3	22
209900	96,39	209900	96,39	209900	96,39	22

Nota. Esta tabla muestra los resultados obtenidos en las pruebas operativa de las bombas. Elaboración propia, en base al documento Mejora de Vertimientos Campo Rubiales.

Se debe tener en cuenta que estas pruebas se ejecutaron de acuerdo con la condición operativa que la bomba B no se encontraba en ese momento en condiciones operativas óptimas. Del mismo modo el caudal operativo de cada una de las bombas fue llevado al límite de capacidad de cada unidad, como se evidencia en la información suministrada, estas fueron operadas hasta el 120% de su capacidad operativa, evidenciándose en las cargas del motor, lo cual indica que en el momento en que fueron probadas en la alineación mencionada anteriormente, las bombas se encontraban trabajando a velocidades mayores a la estándar en la operación. Sin embargo, estos datos son de gran utilidad debido a que permiten hacer una relación comparativa de las pérdidas de presión presentadas en el sistema, entre la prueba de las bombas realizada en campo y el caso base de simulación a condiciones normales.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la simulación de las condiciones operativas que representan la prueba, las bombas A, C y D alineadas a los vertimientos A, C, D y E. Se debe tener en cuenta que el simulador trabaja con la curva de cabeza y eficiencia de la bomba a 60 Hz, y además hace ajustes para conseguir el resultado

requerido a la salida de cada nodo en este caso 60 KBWPD en cada uno de los vertimientos, por esta razón a la descarga de las bombas se evidencia un menor caudal al visto durante las pruebas.

Figura 40.

Resultados a las condiciones de prueba de las bombas

	Name	Type	Pressure (out)	Temperatur...	ST liquid rate
			psig	degF	STB/d
4	PUMP A	Generic pump	95.66794	87.86208	80005.91
5	PUMP C	Generic pump	95.73015	87.86223	79865.22
6	PUMP D	Generic pump	95.61356	87.86194	80128.88
8	J 10	Junction	49.82592	87.87882	78971.42
9	J 11	Junction	49.82694	87.89381	101028.6
10	J 12	Junction	49.82562	87.88895	60000
11	J 13	Junction	49.82332	87.87876	60000
12	J 14	Junction	49.82434	87.89376	60000
21	VA	Sink	81.15242	87.81329	60000
22	VC	Sink	51.48337	87.86533	60000
23	VD	Sink	48.45455	87.88013	60000
24	VE	Sink	28.59933	87.87477	60000

Nota. Esta figura muestra los resultados obtenidos de la simulación representando las pruebas de las bombas. Elaboración propia, interfaz PIPESIM.

Teniendo en cuenta que los nodos nombrados J 11, J 12, J 13 y J14, representan el cabezal de descarga donde se ramifican las líneas de vertimiento hacia sus respectivos puntos C, D y E. Si se comparan las presiones obtenidas en la prueba en campo respecto a las obtenidas en la simulación, se puede decir que existe un cambio representativo en los diferenciales de presión entre la descarga de las bombas y el cabezal de distribución, en cada caso.

Tabla 15.

Comparación de Presiones Prueba vs Simulación

P-A		P-C		P-D		PG-CD	CASO
CAUDAL	P DIS	CAUDAL	P DIS	CAUDAL	PDIS		
195000	97,87	195000	97,87	195000	97,87	22	Prueba
80005.9	95,66	79865.2	95,73	80128.88	95,61	49.82	Simulación

Nota. Esta tabla muestra la comparación de los resultados de las pruebas y su representación en la simulación. Elaboración propia, interfaz PIPESIM.

De acuerdo con estos resultados se puede afirmar que existe la posibilidad que este tramo de la línea referenciado se encuentre obstruido, debido al diferencial de presión observado entre ambos casos, teniendo en cuenta que el caso de simulación busca representar las condiciones normales esperadas del sistema de vertimiento.

3.1.3 Ajuste a condiciones actuales

Para validar lo mencionado anteriormente se procede a hacer una sensibilidad del caso base para conseguir resultados que representen la operación actual del sistema de vertimiento. Inicialmente se identifican las variables que afectan las ecuaciones bajo las cuales se modeló el caso base. Se identifica que la ecuación de Hazen Williams tiene una relación inversa con el factor de fase simple “C” el cual está relacionado con las propiedades de flujo y físicas de la tubería como el factor de fricción y la rugosidad de la tubería. Las demás variables que afectan la ecuación de flujo son los Diámetros de tubería y Longitudes de los tramos. Debido a que no se contemplaron cambios relevantes en las propiedades que representan cambios en la rugosidad y factores que afecten la eficiencia de flujo, se decide hacer la sensibilidad con el SP Factor el cual representa las propiedades anteriormente mencionadas.

Para determinar un factor adecuado, que represente las condiciones actuales de la tubería se debe tener en cuenta que estos factores son establecidos por experiencia en aplicaciones, donde de acuerdo con resultados y lecciones aprendidas se han identificado tres categorías generales para la clasificación de los factores de fase simple; “Range, Average, y Common, donde Range hace referencia a tuberías lisas y con poco desgaste, Average hace referencia a tuberías nuevas o limpias, y Common utilizado para propósitos de diseño” [1].

Figura 41.

Factores de Fricción de fase simple “C” comunes

Type of pipe	“C” values		
	Range ^a	Average ^b	Common ^c
Welded and seamless steel	150-80	140	100
Cement asbestos	160-140	150	140
Fiber	-	150	140
Cement-lined iron	-	150	140
Bitumastic-enamel-lined iron	160-130	148	140
Copper, brass, lead, tin, or glass	150-120	140	130

Nota: Esta tabla muestra la clasificación de factores C. Tomado de: Tomado de: M. Stewart Surface Production Operations, Pipe Line Design. 225 Wyman Street, Waltham, MA 02451, USA Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier.

De acuerdo con lo anterior, se puede decir que a medida que se reduce el valor del factor C se está considerando una tubería de mayor tiempo de uso y propiedades físicas elocuentes a esta condición.

Teniendo en cuenta lo anterior se procede a realizar el ajuste de los factores de fase simple “C”, haciendo reducciones aleatorias en el mismo en el tramo de la línea correspondiente a la bifurcación, y en los tramos de descarga hacia los vertimientos. De esta manera se representa un decremento en la eficiencia de flujo en estos tramos debido al cambio de propiedades físicas en el diámetro interno de la tubería, representando las posibles obstrucciones y reducciones de diámetro en la tubería que se muestra en los diferenciales de presión hasta el cabezal de descarga hacia los 3 vertimientos, observados en la prueba de las bombas y en la simulación, corrida inicial. Se ajustaron a valores en la línea general a un factor “C” de 100, en los puntos de vertimiento C y D se hizo una reducción a factores de 57-60, y en el 5 un incremento a 200 para compensar las pérdidas de presión por elevación y conseguir hacer una representación acorde a los volúmenes de vertimiento actuales y a las presiones evidenciadas en el cabezal de distribución a los ramales, y en los vertimientos.

Una vez ajustados los factores se consigue representar las condiciones actuales del vertimiento, al ajustar los factores de fase simple “C” en el tramo de la bifurcación se consigue obtener los volúmenes vertidos actualmente en los puntos de vertimiento A, B,

C y D. El vertimiento D no alcanza a verter en su totalidad el valor operativo actual, debido a que este se encuentra en un punto de complejidad topográfica que genera mayores pérdidas de presión, lo que imposibilita conseguir los aproximadamente 57KBWPD en los que se encuentra actualmente. Sin embargo, se puede considerar que estos resultados obtenidos representan la situación actual del sistema de vertimiento.

Figura 42.

Ajuste configuraciones Factor “C”

	Name	Vertical multiphase correlation	Vertical multiphase friction factor	Vertical multiphase holdup factor	Horizontal multiphase source	Horizontal multiphase correlation	Horizontal multiphase friction factor	Horizontal multiphase holdup factor	Swap angle deg	SP correlation	SP factor
34	FL 3	Hagedorn...	1	1	Baker Jard...	Beggs & B...	1	1	45	Hazen - W...	100
35	FL 4	Hagedorn...	1	1	Baker Jard...	Beggs & B...	1	1	45	Hazen - W...	100
36	FL 5	Hagedorn...	1	1	Baker Jard...	Beggs & B...	1	1	45	Hazen - W...	100
37	FL 6	Hagedorn...	1	1	Baker Jard...	Beggs & B...	1	1	45	Hazen - W...	100
38	FLV5.1	Hagedorn... ▾	1	1	Baker Jard... ▾	Beggs & B... ▾	1	1	45	Hazen - W... ▾	200
39	FLV5.2	Hagedorn... ▾	1	1	Baker Jard... ▾	Beggs & B... ▾	1	1	45	Hazen - W... ▾	200
40	FLV5.3	Hagedorn... ▾	1	1	Baker Jard... ▾	Beggs & B... ▾	1	1	45	Hazen - W... ▾	200
41	FLV4.1	Hagedorn... ▾	1	1	Baker Jard... ▾	Beggs & B... ▾	1	1	45	Hazen - W... ▾	57
42	FLV4.2	Hagedorn... ▾	1	1	Baker Jard... ▾	Beggs & B... ▾	1	1	45	Hazen - W... ▾	57
43	FL4.3	Hagedorn... ▾	1	1	Baker Jard... ▾	Beggs & B... ▾	1	1	45	Hazen - W... ▾	57
44	FLV3.1	Hagedorn... ▾	1	1	Baker Jard... ▾	Beggs & B... ▾	1	1	45	Hazen - W... ▾	60
45	FLV3.2	Hagedorn... ▾	1	1	Baker Jard... ▾	Beggs & B... ▾	1	1	45	Hazen - W... ▾	60
46	FLV3.3	Hagedorn... ▾	1	1	Baker Jard... ▾	Beggs & B... ▾	1	1	45	Hazen - W... ▾	60
47	FLV1.3	Hagedorn...	1	1	Baker Jard...	Beggs & B...	1	1	45	Hazen - W...	100
48	FLV1.4	Hagedorn...	1	1	Baker Jard...	Beggs & B...	1	1	45	Hazen - W...	100
49	FL 15	Hagedorn...	1	1	Baker Jard...	Beggs & B...	1	1	45	Hazen - W...	100

Nota: Esta figura muestra los resultados obtenidos en la simulación al aplicar la sensibilidad en el factor de fase simple “C”

Figura 43.

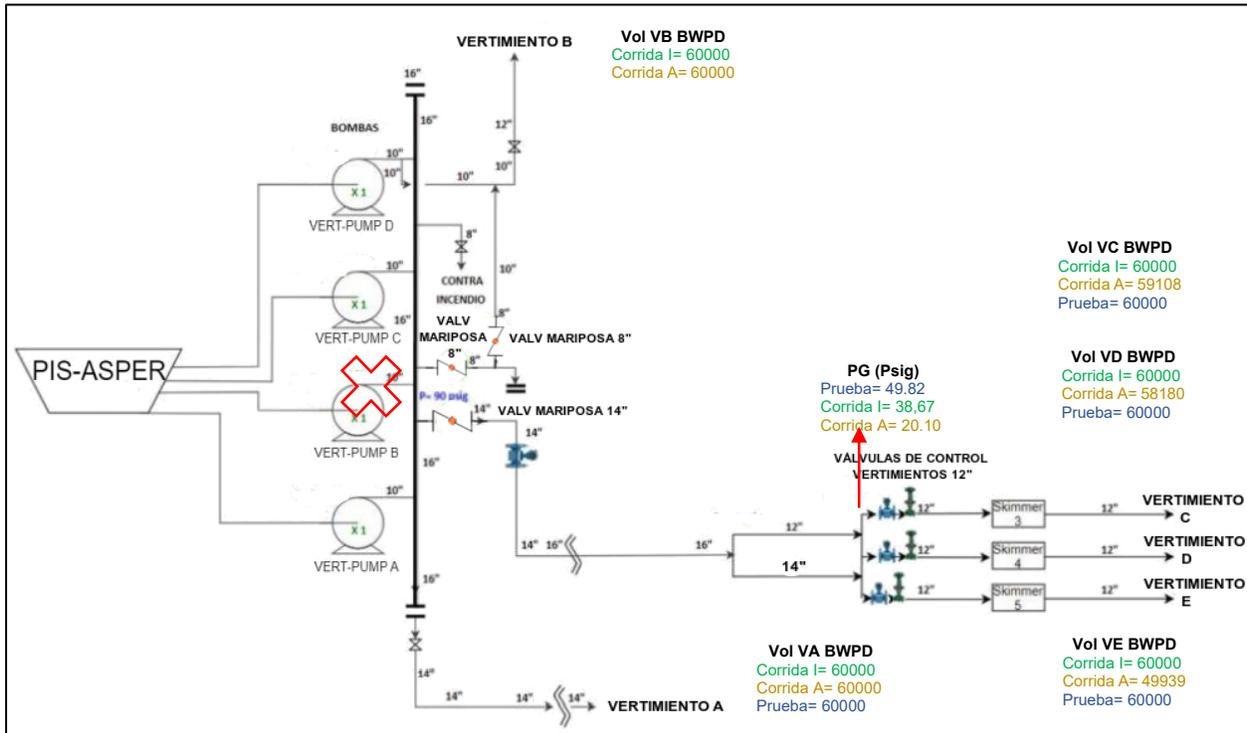
Resultados ajuste caso condiciones actuales

	Name	Type	Pressure (o... psig	Temperatur... degF	ST liquid rate STB/d
10	J 11	Junction	20.10771	87.95119	83499.13
11	J 12	Junction	20.10667	87.95163	58180.93
12	J 13	Junction	20.10425	87.95248	59107.5
13	J 14	Junction	20.10569	87.95112	49938.58
22	VA	Sink	55.88894	87.86573	60000
23	VB	Sink	60.39289	87.89675	60000
24	VC	Sink	0.004051224	88.00203	59107.5
25	VD	Sink	0.004051224	87.99687	58180.93
26	VE	Sink	0.004051224	87.92184	49938.58

Nota: Esta figura muestra los resultados obtenidos en la simulación al aplicar la sensibilidad en el factor de fase simple “C”

Figura 44.

Comparación Resultados Obtenidos



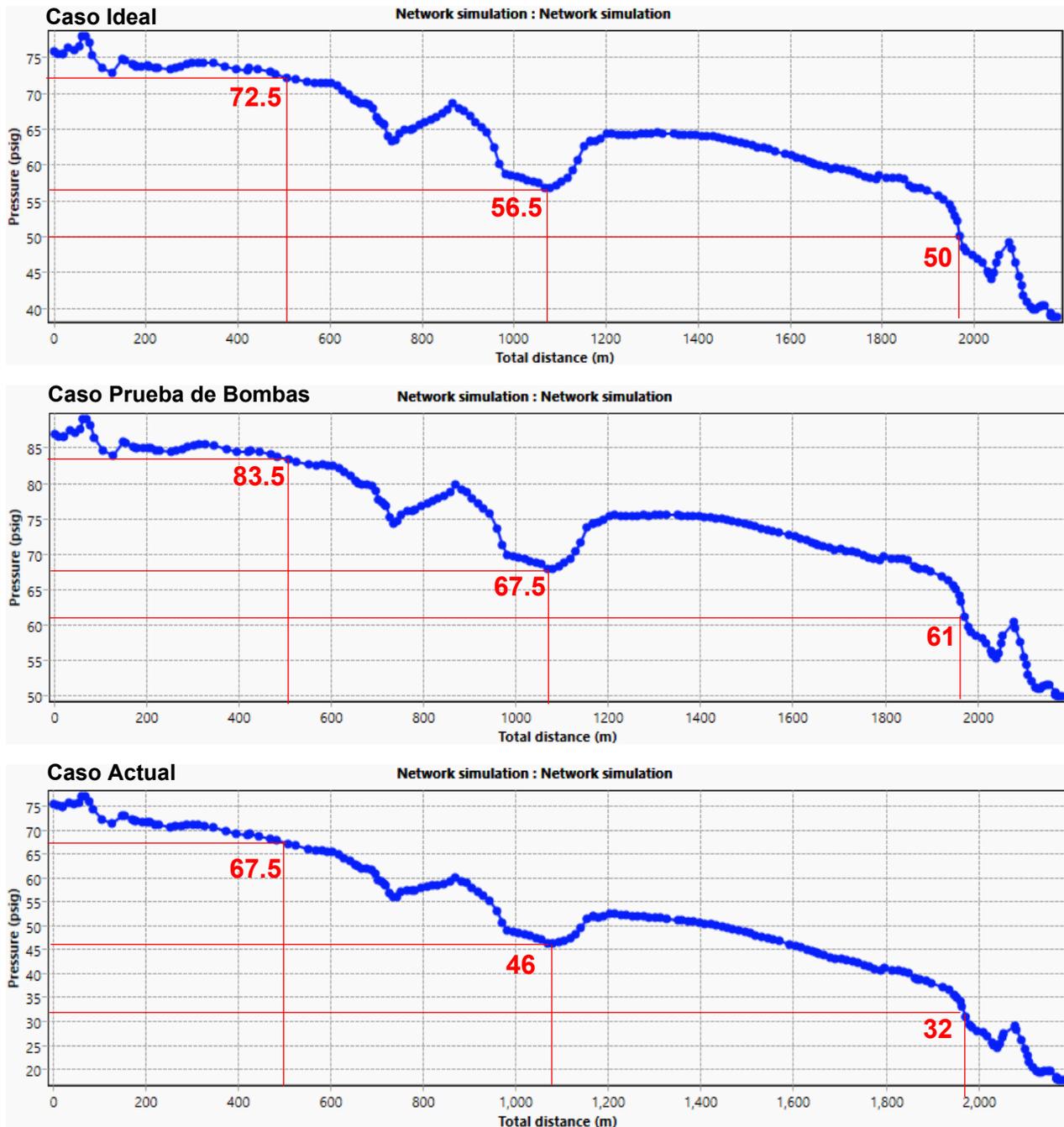
Nota: Esta figura muestra los resultados obtenidos a través del diagrama de proceso la comparación de los resultados obtenidos en cada una de las corridas y pruebas realizadas.

El anterior análisis permite identificar una obstrucción en la línea de vertimiento, teniendo en cuenta que el diferencial de presiones entre el cabezal de descarga de las bombas y el cabezal de distribución donde se ramifican los vertimientos es de aproximadamente 17 PSI en la comparación del caso inicial respecto a la prueba realizada en campo. El planteamiento de los casos de simulación permite representar la situación actual del sistema de vertimiento, dando una aproximación acertada y permitiendo la validación del análisis hidráulico.

A continuación, se muestran los perfiles de presión del tramo de la bifurcación de los tres casos de simulación, donde se identificaron 3 puntos específicos para hacer una lectura de presión, en la comparación de dichos puntos en el caso de simulación ideal frente al caso actual, se puede identificar que se presenta diferencia entre las presiones en los puntos de comparación, y que va incrementando progresivamente a medida que avanza el tramo de tubería

Figura 45.

Perfiles de Presión Casos de Simulación



Nota: Esta figura muestra los perfiles de presión de los diferentes casos de simulación, donde se identifica que son mayores las pérdidas de presión en el caso actual respecto al caso ideal, identificando diferenciales de presión que incrementan con la longitud de la línea.

3.1.4 Caso de Simulación Efectividad de Limpieza

Según aplique la alternativa seleccionada, se elaboraron cuatro casos de simulación a partir de la sensibilización del parámetro de control del modelo de flujo, con el fin de evaluar la efectividad de la alternativa para conseguir optimizar la capacidad volumétrica. Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente sobre la variable de control del modelo de flujo, que a medida que se reduce el factor “C” se está incrementando el factor de fricción y las pérdidas de presión por fricción asociadas a la reducción del área interna de flujo de las tuberías, a medida que se incrementa “C” se reducen las pérdidas y la fricción en la tubería.

A partir de lo anterior se modifica el caso que representa las condiciones actuales el cual tiene un factor de fase simple “C” promedio de 100, y en la bifurcación de 90, modificando a casos consecutivos el factor “C” en el área de interés (La Bifurcación) a 110, 115, 120 y 125, manteniendo constantes los demás factores de la red respecto al caso actual. Donde la comparación de la efectividad se hizo respecto al valor máximo del rango de factores C establecido por la bibliografía que se puede ver en la **Figura 41** que es de 140.

Teniendo en cuenta que el caso inicial de simulación contaba con un factor de 130 (92%) respecto a límite superior y este cumplía con las condiciones de caudal, los casos representaron la efectividad en base al 100% (140) a partir del caso actual 71% (100), obteniendo; 78.6% (110), 82.6% (115), 85.7% (120) y 89.3% (125) efectividad en el incremento del área de flujo.

De acuerdo con los valores obtenidos se puede identificar que al incrementar el valor del factor de fase simple a 110 se incrementa en un 8% la efectividad de flujo respecto al caso que representa la actualidad, con este incremento se consigue cumplir con los requerimientos de caudal de 60KBWPD en cada uno de los 5 puntos de vertimiento. Del mismo modo, los casos consecutivos en los cuales se incrementó el factor de fase simple cumplieron con los requerimientos de caudal y con las variables operativas bajo las cuales se rige el proceso en presiones de descarga y caudal, lo cual indica que únicamente con el incremento en el 8% del área de flujo se conseguirá la optimización del sistema de vertimiento de Campo Rubiales a 300KBWPD.

Figura 46.

Tabla de Resultados, Simulación Efectividad.

		Case effectiveness 78.6%			Case effectiveness 82.6%			Case effectiveness 85.7%			Case effectiveness 89.3%		
		SP "C"	110		SP "C"	115		SP "C"	120		SP "C"	125	
Name	Type	P Out(Psig)	Temp (°F)	Liquid Rate (STB/D)	P Out(Psig)	Temp (°F)	Liquid Rate (STB/D)	P Out(Psig)	Temp (°F)	Liquid Rate (STB/D)	P Out(Psig)	Temp (°F)	Liquid Rate (STB/D)
PUMP A	Generic pump	85.9	87.9	99332.0	85.9	87.9	99370.9	85.8	87.9	99404.8	85.8	87.9	99434.0
PUMP C	Generic pump	86.0	87.9	99230.9	85.9	87.9	99279.0	85.9	87.9	99320.9	85.9	87.9	99357.2
PUMP D	Generic pump	84.5	87.9	101437.1	84.5	87.9	101350.1	84.6	87.9	101274.3	84.6	87.9	101208.8
C8BC	Junction	80.9	87.9	3955.7	81.3	87.9	3506.9	81.6	87.9	2985.1	81.9	87.9	2369.1
J 10	Junction	21.4	87.9	78971.4	27.0	87.9	78954.8	31.1	87.9	78971.4	35.1	87.9	78971.4
J 11	Junction	21.4	88.0	101028.6	27.0	87.9	101045.2	31.1	87.9	101028.6	35.1	87.9	101028.6
J 12	Junction	21.4	87.9	60000.0	27.0	87.9	60000.0	31.1	87.9	60000.0	35.1	87.9	60000.0
J 13	Junction	21.4	87.9	60000.0	27.0	87.9	60000.0	31.1	87.9	60000.0	35.1	87.9	60000.0
J 14	Junction	21.4	88.0	60000.0	27.0	87.9	60000.0	31.1	87.9	60000.0	35.1	87.9	60000.0
VA	Sink	66.0	87.8	60000.0	67.0	87.8	60000.0	67.9	87.8	60000.0	68.7	87.8	60000.0
VB	Sink	64.3	87.9	60000.0	65.1	87.9	60000.0	65.9	87.9	60000.0	66.6	87.9	60000.0
VC	Sink	3.7	88.0	60000.0	9.3	88.0	60000.0	13.3	88.0	60000.0	17.3	87.9	60000.0
VD	Sink	3.7	88.0	60000.0	9.3	88.0	60000.0	13.4	88.0	60000.0	17.4	87.9	60000.0
VE	Sink	3.1	87.9	60000.0	8.7	87.9	60000.0	12.8	87.9	60000.0	16.8	87.9	60000.0

Nota: Esta figura muestra los resultados de los casos de simulación representando la efectividad de flujo conseguida.

3.2 Consideraciones de Alternativas

Acorde con los resultados obtenidos de la simulación, se hace necesario evaluar cada una de las alternativas planteadas previamente para la limpieza de tuberías y remoción de obstrucciones, enfocando cada una de las opciones planteadas para este fin a las condiciones del caso de estudio del sistema de vertimiento de Campo Rubiales, con sus respectivos parámetros operativos y de diseño.

3.2.1 Limpieza Química

Teniendo en cuenta los criterios mencionados anteriormente en el marco teórico y que la composición del agua nos indica un valor promedio aproximado de 3ppm en Grasas y Aceites (G&A) se establece que la mejor opción a realizar sería una limpieza con una solución alcalina, la cual es adecuada para remover residuos de G&A que podrían quedar adheridos en las tuberías al pasar de los años, aunque el contenido de esta en el agua de vertimiento en el campo registra valores extremadamente bajos.

Se propone las siguientes soluciones alcalinas para realizar la limpieza:

Tabla 16.

Composición de soluciones alcalinas

Solución	Químico	Lb/1000lb agua
1	Soda Caustica (NaOH)	3
	Carbonato de Sodio (Na ₂ CO ₃)	3
2	Soda Caustica (NaOH)	2,5
	Fosfato trisódico (Na ₃ PO ₄)	2,5
3	Soda Caustica (NaOH)	3

Nota: Esta tabla muestra las soluciones propuestas, las cantidades de química deberán ser establecidas por la empresa contratista.

Teniendo en cuenta las fichas técnicas de cada uno de los productos a utilizar, se establece que son altamente empleados en la industria para limpieza y remoción de grasas y aceites en especial el hidróxido de sodio comúnmente conocido como Soda Caustica, que es la base de las soluciones anteriormente planteadas.

El hidróxido de sodio comúnmente conocido como soda caustica debe estar en 98% de concentración como mínimo, se presenta en fragmentos o escamas con fracturas cristalinas, soluble en agua 109 gr/100 ml a 25°C o 342 gr/100 ml a 100 °C .Es un químico altamente empleado como detergente en la industria para limpieza y remoción de grasas y aceites ya sea que se emplee de forma directa o como compuesto, sus propiedades alcalinas permiten neutralizar ácidos y tener un mejor control de pH es por eso que su uso es tan amplio en la industria. A continuación, se presenta la tabla con las especificaciones del producto recomendadas.

Tabla 17.

Composición de soluciones alcalinas

NaOH	98 % Mín.
Na ₂ CO ₃	0,8 % Máx.
NaCl	0,1 % Máx.
Fe ₂ O ₃	0,1 % Máx.

Nota: Esta tabla muestra la composición recomendada para el uso del producto en la limpieza. Tomado de: Ficha técnica Soda Caustica DQI.

De igual manera se deben tener extremas precauciones para la manipulación de este químico, debido a que es extremadamente corrosivo, la correcta planeación y divulgación de riesgo ayudará a mitigar el daño a personas o al ambiente en su defecto.

Por otro lado, tenemos el Carbonato de sodio también conocido como soda de limpieza, es un polvo granulado de color blanco, altamente higroscópico, moderadamente soluble en agua y es estable en condiciones ambientales normales y en seco. Este componente es utilizado en la industria para la preparación de soda caustica (caustificación) y al ser usado como detergente es un neutralizante, tienen una solubilidad en agua de 30.7g por cada 100g de agua (25°C) es por eso que al emplearlo en la mezcla con la soda caustica tendremos una solución estable y se reducirá el daño en las tuberías por corrosión.

Por último, el fosfato trisódico es un agente de limpieza y desengrasante, es blanco, granular y solido cristalino, altamente soluble en agua con 8,8g por cada 100g de agua con un pH entre 10 y 12 o que lo hace altamente alcalino. Es ampliamente utilizado en la

limpieza como detergente, sin embargo, este compuesto a diferencia de los otros presenta mayores complicaciones al medio ambiente, no obstante, al realizar la mezcla con la soda caustica tenemos una solución más estable.

Este producto es extremadamente corrosivo y altamente reactivo, el Carbonato de Sodio reacciona con ácidos y finalmente el Fosfato trisódico al igual que los otros productos es altamente alcalino es por esto que se debe realizar una correcta planeación de la limpieza química que se va a realizar para mitigar el riesgo de daño a personas o al ambiente en su defecto.

Se cuenta con un análisis fisicoquímico, clasificado como información confidencial, en el cual se muestra que las propiedades relacionadas en la **Figura 30. Parámetros Físico-Químicos Agua de Vertimiento**, principalmente la dureza total, dureza cálcica y grasas y aceites no presentan un patrón de variación definido entre las condiciones del agua en la fuente y la descarga, en el vertimiento 3 se ve una ligera reducción en la dureza respecto al análisis fisicoquímico de la fuente, en los demás vertimientos se nota un ligero incremento en la dureza cálcica y un leve decremento en la dureza total, no existe una señal de cambio considerable en la concentración de estos parámetros. El único en el cual se observa una reducción considerable en los 3 puntos de vertimiento en +/- 50 mg/L son los cloruros. Estos cambios que se han podido evidenciar, no dan certeza de la posible precipitación de sólidos o formación de incrustaciones en la tubería, por lo cual no se puede asociar una metodología de tratamiento en base a esta evidencia de cambio de parámetros en el agua.

3.2.1.a Planeación de la limpieza química. Es importante tener en cuenta que para la limpieza que se desea realizar, el vertimiento debe estar apagado, los skimmers desocupados y limpios, por lo tanto, antes que todo se debe asegurar la correcta limpieza del skimmer para prevenir posibles reacciones adversas con el químico y la contaminación dentro de ellos que podría o no reaccionar y ser causal de un incidente.

Se debe determinar la cantidad en volumen de tratamiento químico, el cual deberá ser determinado de acuerdo a la capacidad de la tubería común mente esta cantidad de volumen de sea cual sea la solución a utilizar para la limpieza es determinado según el

volumen de llenado de la tubería, considerando un porcentaje de exceso para que todo el tramo destinado a limpieza, entre en contacto con el producto para resolver el problema de incrustación. Por lo cual, de acuerdo con la información suministrada los volúmenes de llenado de ambos tramos son los siguientes;

Tabla 18.

Volúmenes de Llenado

Volumen de llenado de las Tuberías					
Línea	Origen	Llegada	Diámetro	Longitud m	Capacidad BIs
1	Bifurcación fuera de la PIS-VER	Cabezal de Distribución	12 in	2147	987
2	Bifurcación fuera de la PIS-VER	Cabezal de Distribución	14 in	2147	1205
Volumen de Solución de Tratamiento			2850 bbls	+ 30% Ex	2192

Nota: Esta tabla muestran los resultados del cálculo de las capacidades de los dos tramos de tubería.

Llenado de tubería: Durante el empaquetado de la tubería con el producto se deben abrir todos los puntos de venteo, una vez llenada la línea, se hace la prueba hidrostática. Las presiones para llevar a cabo una limpieza química deben ser similares a las presiones a condiciones normales de operación.

Prueba Hidrostática: Se debe tener en cuenta que se debe realizar una prueba de presión para determinar que no haya fugas en el tramo de línea para lo cual se estabilizará el bombeo a el caudal determinado por el supervisor de la operación y se deberá mantener la presión durante un tiempo prudente. y se comienza la circulación del producto los caudales recomendados por la compañía proveedora del servicio de limpieza para que se obtenga mejor efectividad de disolución de incrustaciones.

Circulación: Se circula la solución de limpieza a las condiciones de caudal y presión especificadas por el proveedor, durante el tiempo requerido. Se mide la efectividad haciendo análisis fisicoquímicos del fluido y/o haciendo seguimiento de presiones diferenciales y a la descarga del vertimiento.

Pasivación: Una vez se hayan identificado resultados favorables, se debe llevar a cabo la circulación de baches de pasivación para evitar que las propiedades de la solución de

limpieza afecten la integridad de la tubería o posteriormente la calidad del producto que se transporta por la línea de flujo.

Adicional a esto se debe tener en la etapa de planeación los siguientes riesgos operacionales: *Comunicación con el personal de la empresa y el contratista, Daños por corrosión debido a los químicos de limpieza, Daño mecánico por equipos de limpieza, Lesiones al personal de trabajo por químicos y equipo de limpieza. Residuos del químico en las líneas tratadas, Problemas de disposición de residuos.*

Tabla 19.

Requerimientos de la Limpieza Química

REQUERIMIENTOS PARA LA LIMPIEZA QUÍMICA DE TUBERÍA	
EQUIPO	VALOR
QUÍMICA DE LIMPIEZA: Se requiere de los productos y soluciones para el tratamiento químico de la línea, del mismo modo se requiere del almacenamiento para los productos. También es requerido el almacenamiento.	193 USD / Kg
QUÍMICA DE NEUTRALIZACIÓN: Se requiere de un producto que posterior a la remoción pasive la agresividad de las sustancias generadas durante la limpieza, el pH de la superficie interior debe permanecer neutro para garantizar la calidad de los productos enviados a través de la tubería y para evitar procesos de corrosión.	270 USD / Kg
PATÍN DE BOMBEO: La unidad de suministro de química al sistema es diferente de la unidad de desplazamiento de sistema de vertimiento.	6000 USD / Week
FRACK TANK Y UNIDAD Se requiere de estos equipos para la recuperación de residuos en los Skimmer.	5000 USD / Week

Nota: Esta tabla muestra los requerimientos y precios para ejecutar la operación limpieza Química.

Teniendo en cuenta que por efectos de restricciones sanitarias no son permitidas salidas a campo para recolectar muestras, y que el químico planteado para la limpieza se seleccionó en base a los parámetros de calidad del agua de vertimiento relacionados con contenidos de Grasas y Aceites, el desarrollo de esta alternativa de limpieza química tiene asociado un alto grado de incertidumbre en su efectividad debido a lo mencionado anteriormente.

3.2.2 Limpieza Mecánica

De acuerdo con lo mencionado anteriormente y las características del caso de estudio del sistema de vertimiento, el cerdo raspador indicado para la operación de limpieza es un cerdo tipo espuma, elaborado en espuma de poliuretano de celdas abiertas, sus características de trabajo son el retiro de agua, separación y evacuación de productos, limpieza y remoción de sólidos. Las propiedades del material que lo componen le permiten tener gran flexibilidad para permitir el paso a través de las curvas más pronunciadas durante el trayecto.

Teniendo en cuenta los pasos para una operación de limpieza mencionados en el marco teórico, se deberán realizar tres lanzamientos, inicialmente se requiere de un raspador de menor diámetro, que cumpla la función de inspeccionar la tubería, e identificar la magnitud del material en las paredes al interior de la tubería, denominado de limpieza regular **RBS (Red Bare Squeegee) Regular Wiping & Dewatering**. Posteriormente se debe realizar la corrida de un raspador de mayor diámetro que cumpla la función de desplazamiento **RCC (Red Criss-Cross) Regular Cleaning & Dewatering**, este tipo de raspadores pueden tener variaciones de materiales y configuraciones en sus recubrimientos externos, que favorezcan el desprendimiento del material depositado en las paredes internas de las tuberías.

Figura 47.

Pig de limpieza recomendado



Nota: Esta figura muestra los marranos recomendados para la alternativa planteada. Tomado de: Girard Polly-Pigs “*Polly-Pigs Industrial Pipeline Cleaners*”, Brochure. [En línea]. Disponible en: https://girardindustries.com/pdf/Brochure_Pollypig.pdf

Para el caso de estudio puntual se requiere utilizar trampas temporales debido a que esta operación de mantenimiento no es recurrente, y además no se cuenta con la disponibilidad de espacio, tiempo y dinero para adaptar trampas de envío y recepción permanentes. De acuerdo con lo anterior, las principales ventajas de utilizar este tipo de lanzadores son:

- No es necesario fabricar el lanzador para adaptarse a un I / D en particular, sino para adaptarse al O / D que, por supuesto, está mucho más estandarizado en toda la industria. Esto permite la estandarización de piezas, dando confiabilidad a las aplicaciones.
- El tiempo de instalación de una trampa removible en comparación con un lanzador estándar, tiene un beneficio notorio en el tiempo de instalación.
- Un lanzador / receptor portable también puede tener la ventaja de ser más fácil de mantener y limpiar, ya que no está conectado permanentemente a la tubería.
- El lanzador se puede precargar con el cerdo requerido quitando la brida / puerta en la parte trasera de la unidad. La precarga puede resultar beneficiosa en los casos en los que se ha proporcionado poca provisión al área de manipulación de cerdos, por ejemplo, debajo de una plataforma.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, las múltiples corridas de los raspadores permiten identificar la eficiencia de remoción de la operación, a medida que incrementa el tamaño del raspador y la presurización de la línea se permitirá incrementar la eficiencia de remoción, e incrementar el diámetro efectivo de flujo de la tubería [11]. En base a esto, se puede establecer que la alternativa de limpieza mecánica tiene un grado de incertidumbre medio, asociado a las propiedades físicas de la obstrucción.

Figura 48.

Lanzador portable de raspador



Nota. Esta figura muestra una ilustración de una trampa de lanzamiento de marranos portable. Tomado de: Inpipe Products “*Portable Pig Launchers*”, Brochure. [En línea]. Disponible en: <https://www.inpipeproducts.com/product/portable-pig-launchers/> .[Acceso: Abril, 2021].

Adicionalmente, durante la actividad de limpieza de las líneas de vertimiento se utilizará equipo de seguimiento y localización, cada pig de raspador de limpieza debe llevar en su interior un transmisor el que emita señales electromagnéticas, de tal manera que el personal técnico y de operaciones pueda hacer seguimiento de la trayectoria que recorre el raspador por medio de un equipo que detecte las señales recogidas del raspador.

Básicamente, el pig tracking hace referencia al rastreo y monitoreo de la localización de un raspador en una tubería, siendo importante para el control de la seguridad y eficiencia de la operación. Permite registrar la velocidad del raspador para así de esta manera permitir tomar decisiones y tener control de la operación. Adicionalmente, este sistema funcionará para determinar cambios de alineación de las válvulas del sistema de vertimiento y transferencia cuando se vaya acercando el raspador al punto de recepción, arrastrando consigo toda la borra generada producto de la limpieza.

Figura 49.

Equipo de Pig Tracking



Nota. Esta figura muestra una el equipo tipo de Pig Tracking y cómo lucen los transmisores que van dentro del raspador. Tomado de: Elastómeros PVM “Soluciones Pig Tracking”. [En línea]. Disponible en: <http://elastomerospvm.com/portfolio-item/pig-tracking/> [Acceso: Abril, 2021].

Teniendo en cuenta que la opción es utilizar trampas removibles portátiles para la operación se requieren los siguientes recursos:

Tabla 20.

Requerimientos de la Limpieza Mecánica

REQUERIMIENTOS PARA LA LIMPIEZA MECÁNICA DE TUBERÍA	
EQUIPO	VALOR ESTIMADO
RASPADORES: Se requieren 6 raspadores de las características mencionadas anteriormente, de 8, 10, 12 y 14 in, para la limpieza de las líneas de 12 y 14 in, en simultaneo.	RBS: 120 USD X 4 RCC: 150 USD X 2
TRAMPAS LANZADORAS PORTÁTILES: Se requiere la instalación de un juego de trampas lanzadoras y receptoras para cada una de las líneas de 12 y 14 in.	Trampas de 12 in: 1000 USD/Week Trampas de 14 in: 1500 USD/Week
LÍNEAS DE FLUJO: Tubería y mangueras de conexionado para la operación.	1000 USD / Week
TRABAJOS DE INSTALACIÓN EN CAMPO: Se requieren equipos de izaje, soldadura y herramientas varias para la instalación de las trampas.	10000 USD/ Week
FRACK TANK Y CAMIÓN DE VACÍO: Se requiere de estos equipos para la recuperación de residuos	5000 USD / Week

Nota. Esta tabla muestra los equipos requeridos para la operación de la Limpieza Mecánica, y su valor estimado.

3.2.3 Cambio de Tramos de Línea de Bifurcación

En el caso particular del cambio de los tramos de línea mencionados anteriormente, se deben considerar criterios de diseño mencionados en el marco teórico para la construcción de ductos y selección de materiales. Esto de acuerdo con los estándares de diseño y manuales de procedimiento y construcción de ductos de la compañía. Criterios de selección de tubería:

- Presión máxima de operación
- Presión diseño
- Temperatura de diseño
- Tipo de fluido
- Materiales

3.2.3.a Presión de diseño. Para tuberías como las que necesitamos en el campo se emplea lo siguiente, la presión de diseño es el mayor resultado numérico entre el 110% de la presión máxima de operación y la presión máxima de operación sumándole 25 Psig.

$$\textit{Presión de diseño} = \textit{Presión máxima de operación} + 25 \textit{ psig}$$

$$\textit{Presión de diseño} = 1,1 * \textit{Presión máxima de operación}$$

3.2.3.b Temperatura de diseño. Teniendo en cuenta que los controles de temperatura nos indican un rango de operación normal entre 90°F y 105°F, se emplea que la temperatura de diseño del material deberá ser la temperatura máxima del fluido contenido en la tubería reducida en los porcentajes mostrados en la siguiente tabla:

3.2.3.c Selección de materiales. Realizar una correcta selección de materiales que se pueden utilizar en el sistema de vertimiento representa un punto clave para el diseño, esto se debe a la alta inversión que se requiere y también para garantizar la integridad del mismo. Se recomienda mantener el mismo material a largo de todo el tramo que se desea cambiar, esto para evitar o reducir la corrosión galvánica que se puede generar por contacto entre materiales diferentes.

En esta sección se seguirá la filosofía de la empresa manteniendo el material como acero inoxidable a pesar que el fluido que se mueve en el sistema no genera corrosión interna en las tuberías actuales. De igual manera se seguirán los estándares API-5L y ASTM A789 para tuberías de acero sin costura.

Figura 50.

Propiedades Mecánicas y Químicas API-5L

Steel grade (Steel name)	Chemical Composition				Pipe grade	Mechanical Properties			
	Mass fraction, based upon heat and product analyses					Pipe body of seamless and welded pipes			Weld seam of EW, LW, SAW and COW pipes
	C max	Mn max	P max	S max		Yield strength	Tensile strength	Tensile strength	
PSL 1 pipe with t ≤ 25.0 mm (0.984 in)									
Seamless pipe									
X42	0.28	1.30	0.030	0.030	API 5L X42 PSL 1 pipe	MPa (psi)	MPa (psi)	MPa (psi), min	
Welded pipe									
X42	0.26	1.30	0.030	0.030	API 5L X42 PSL 2 pipe	minimum	minimum	415 (60 200)	
PSL 2 pipe with t ≤ 25.0 mm (0.984 in)									
Seamless pipe									
X42R	0.24	1.20	0.025	0.015	API 5L X42 PSL 2 pipe	290 (42 100)	415 (60 200)	415 (60 200)	
X42N	0.24	1.20	0.025	0.015		Welded pipe			
X42Q	0.18	1.40	0.025	0.015	API 5L X42 PSL 2 pipe	minimum	maximum	minimum	
X42M	0.22	1.30	0.025	0.015		X42R	290 (42 100)	495 (71 800)	415 (60 200)
Welded pipe									
X42M	0.22	1.30	0.025	0.015	X42N	290 (42 100)	495 (71 800)	415 (60 200)	
Welded pipe									
X42M	0.22	1.30	0.025	0.015	X42N	290 (42 100)	495 (71 800)	415 (60 200)	

Nota. Esta tabla muestra las propiedades para la tubería API-5L X42. Tomado de: Octalacero “Especificación de Tubería API 5L X42”. [En línea]. Disponible en: <https://www.octalacero.com/tuberial-api-5l-x42> .[Acceso: Abril, 2021].

La construcción de un ducto de las especificaciones requeridas mencionadas y anteriormente requiere de un diseño de ingeniería a detalle, y además un nivel de logística y planeación mucho mayor que las anteriores alternativas. Se definieron los siguientes costos asociados a dicha operación por metro construido de tubería.

Tabla 21.

Requerimientos de la Reconstrucción de la Bifurcación

REQUERIMIENTOS PARA EL CAMBIO DE TUBERÍA TRAMO BIFURCACIÓN.	
EQUIPO	VALOR ESTIMADO
Construcción de Línea: El valor estimado para la construcción de un metro de tubería, incluye todos los servicios de ingeniería operación y logística asociada a la instalación de un metro de tubería, con pruebas y revisiones previas hasta la puesta en línea del sistema. Teniendo en cuenta que la construcción sería para 2147 m cada una de las líneas para un valor aproximado de \$5'000.000 USD	1000 USD/ M CONSTRUIDO 12” 1328 USD/ M CONSTRUIDO 14”

Nota: Esta tabla muestra los precios aproximados para los requerimientos de cambio de tubería.

3.2.4 Selección de Alternativa

De acuerdo con las consideraciones establecidas anteriormente para cada una de las alternativas propuestas, se evaluaron de acuerdo a los criterios establecidos en la metodología de matriz de calificación de alternativas, donde se tomaron como aspectos de evaluación principalmente la facilidad de implementación, los costos, la incertidumbre en la efectividad y el posible impacto a personas y medio ambiente.

Figura 51.

Resultado Rango de Evaluación de Alternativas

RIESGO		
Bajo	1	30
Medio	31	60
Alto	>60	

Nota: Esta figura muestra la ubicación del resultado en rangos de evaluación para las alternativas planteadas

De acuerdo al puntaje que se le dio a cada una de las alternativas, **la alternativa de menor riesgo de implementación para desarrollo de contexto académico fue la Limpieza Mecánica con un puntaje de 36 U.**

La alternativa de **Limpieza Química** comúnmente es la que se desarrolla en primera instancia en las operaciones de mantenimiento de tuberías. En este caso de estudio, se cuenta con análisis físico-químicos del agua de vertimiento tanto en la fuente como en la descarga, a partir de estos se pudo evidenciar que existe un único parámetro que presenta variación considerable entre la succión y la descarga de los vertimientos y es la concentración de **Cloruros**, un diferencial de **+/- 50 mg/L**, en los demás parámetros de comparación no existen variaciones significativas. De acuerdo con esto, se asocia un grado alto de incertidumbre para el desarrollo académico de esta alternativa debido a que, aunque se puede determinar una variación en uno de los parámetros, no se tiene la certeza que éste sea el que está generando las incrustaciones en el interior de la tubería, generando la reducción del diámetro de flujo efectivo y ocasionando mayores pérdidas de presión, adicionalmente no se cuenta con la certeza que los tiempos de muestreo de ambos parámetros coincidan, no se conocen bajo que métodos fueron tomadas dichas

muestras para identificar los parámetros fisicoquímicos del agua. Para identificar esto se requería de un estudio adicional en el cual se obtuviera una muestra y se estudiara y simulara para conseguir un producto que sea capaz de disolver los sólidos que obstruyen la tubería. Adicionalmente, teniendo en cuenta que no existe una experiencia previa de mantenimientos en el sistema de vertimiento durante sus más de 20 años de operación, se requiere de un análisis químico y de integridad específico para determinar el producto químico adecuado para llevar a cabo la limpieza química. Adicionalmente para la calificación fueron considerados riesgos asociados al manejo y disposición de sustancias químicas. Los riesgos asociados a la operación, como pérdidas de contención, aspiración de vapores, salpicaduras que entren en contacto con la piel, fueron aspectos tenidos en cuenta para la valoración, teniendo en cuenta que el manejo de sustancias químicas tiene asociados riesgos potenciales adicionales respecto a otras operaciones normales.

Por otro lado, la alternativa de la construcción **y cambio de las líneas del tramo de la bifurcación**, es el último recurso para reestablecer la capacidad del vertimiento debido a que se requiere de una gran inversión capitalizable, del mismo modo la logística que requiere un proyecto de construcción de una nueva facilidad es bastante complejo, lo cual conlleva a un incremento en costos y tiempo de implementación. Adicionalmente tiene una alta calificación en los impactos ambientales teniendo en cuenta que para un proyecto de esta magnitud se requiere generación, transporte, uso del suelo entre otras, a medida que se juntan escenarios de peligro y actividades simultáneas incrementa el riesgo de la operación. Por otro lado, la planeación de estos proyectos requiere de una ingeniería conceptual y de diseño a detalle, la cual debe ser llevada a cabo por una compañía especialista en diseño y construcción de ductos, esto también incrementa los precios de implementación, por esta razón no se ajusta al desarrollo metodológico que pretende llevar el presente caso de estudio. De esta manera fue evaluada esta alternativa.

Finalmente, la alternativa seleccionada, Limpieza Mecánica, es evaluada bajo los mismos criterios. Inicialmente se consideró que a pesar que nunca ha sido implementada esta opción de mantenimiento existen nuevas tecnologías que se adaptan a las facilidades actuales para hacer la limpieza mecánica de una manera segura y eficaz,

como lo son las trampas portátiles o removibles, las cuales pueden ser adquiridas o rentadas para la operación únicamente, por lo cual es una alternativa muy versátil y económica. De acuerdo con la bibliografía comúnmente se llevan a cabo múltiples corridas para garantizar la inspección de la línea, evitar el atascamiento del raspador. A medida que incrementa el diámetro de raspador se debe incrementar la presión de operación para el desplazamiento, siempre y cuando se mantenga una presión diferencial moderada para evitar daños en el raspador, se podrá incrementar la eficiencia de limpieza de la operación. La herramienta se ajusta directamente al diámetro de tubería de trabajo por lo cual los riesgos a la integridad de las instalaciones son muy bajos. La logística asociada a la limpieza mecánica es de la misma magnitud que la de la limpieza química, se requiere tener de camiones de vacío y frack tanks y bulk drums para almacenar los residuos provenientes del interior de la tubería, adicionalmente se requiere de un equipo de rastreo, que permita identificar la localización del raspador y registre las variables de operación del mismo.

Figura 52.

Resultado Evaluación de Alternativas

Parámetros	RIESGO			ALTERNATIVAS		
	BAJO	MEDIO	ALTO	QUÍMICA	MECÁNICA	CAMBIO DE TUBERÍA
FACILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN	1	5	10			
Equipos disponibles para la implementación	Se tienen todos los equipos requeridos para la operación	Se tienen algunos de los equipos requeridos para la operación	No se cuenta con ningún equipo requerido para la alternativa.	5	5	10
Logística	Movilización de suministros rápida y disponibilidad inmediata. Planeación por operaciones. SIMOPS	Movilización de suministros media y disponibilidad por solicitud y orden de compra. Planeación por ingeniería. No actividades simultáneas	Movilización de suministros lenta y planeación externa, obras civiles y requerimientos de MOC para continuar operación.	1	1	5
Riesgo de integridad	La alternativa no representa un riesgo asociado a la integridad de los equipos y al aseguramiento de flujo	La alternativa sí representa riesgo para la integridad equipos y al aseguramiento de flujo	La alternativa representa un alto riesgo para la integridad de los equipos y el aseguramiento de flujo	5	1	1
Tiempo de implementación	De 1 a 5 días	Entre 5 y 15 días	Más de 30 días	1	1	10
COSTOS	1	5	10			
Inversión Capex	0 - 500.000 USD	500.000 - 2'500.000 USD	Más de 2'500.000 USD	1	1	10
Inversión Opex	0 - 500.000 USD	500.000 - 2'500.000 USD	Más de 2'500.000 USD	1	1	1
INCERTIDUMBRE	1	5	10			
Frecuencia de Implementación	Se ha hecho más de 5 veces	Se ha hecho al menos una vez	No se ha hecho nunca	1	10	5
Resultados de Implementación previa.	Funcionó cuando se implementó	No se ha evaluado los resultados	No funcionó cuando se implementó	10	-	5
Eficiencia de remoción de obstrucciones dentro de la tubería	Alta certeza de eficiencia de acuerdo a las condiciones del caso	Media certeza de eficiencia de acuerdo a las condiciones del caso	Baja certeza de eficiencia de acuerdo a las condiciones del caso	10	5	1
IMPACTO	1	5	10			
Daño a personas	Lesiones leves, golpes o moretones	Incapacidad temporal	Incapacidad permanente	5	1	5
Afectación ambiental	Uso de suelos, ruido, emisiones	Pérdida de contención controlable	Pérdida de contención, cambio de propiedades fisicoquímicas del ambiente.	5	5	10
Reputación	Quejas o reclamos	No conseguir resultados oportunos, interrumpiendo las operaciones.	Pérdida de confianza debido a incidentes operacionales o ambientales	5	5	1
TOTAL				50	36	64

Nota. Esta figura muestra el resultado de la evaluación de las alternativas planteada.

3.3 Desarrollo de la alternativa seleccionada.

El desarrollo de la alternativa “Limpieza Mecánica” se hará bajo el siguiente flujo de trabajo; se define la locación en la cual se instalarán las trampas receptoras, se crea el respectivo Layout, se identifica la logística requerida, se establece el diseño requerido y la especificación de las trampas, finalmente se establece el procedimiento preliminar para la ejecución de la operación.

3.3.1 Locación

De acuerdo con lo mencionado en capítulos anteriores el objetivo de esta alternativa es desarrollar la limpieza progresiva de los tramos de línea analizados anteriormente, la bifurcación de 12 y 14” del sistema de vertimiento de Campo Rubiales. El lanzamiento de los raspadores se llevará a cabo en el punto de la bifurcación en este punto cada línea, de 12 y 14” cuentan con una válvula de corte tipo compuerta, lo cual permitirá introducir el raspador al sistema y del mismo modo presurizar la línea para el lanzamiento del raspador.

Figura 53.

Punto de Lanzamiento de los Raspadores



Nota. Esta figura muestra el punto de lanzamiento en una vista de planta, y una vista panorámica donde se evidencian las válvulas de seccionamiento donde se hará la adecuación para la introducción raspador.

La recepción de los raspadores se hará en el cabezal de distribución hacia los tres puntos de vertimiento en la sección de la bifurcación, punto en el cual se obtuvieron las lecturas de presión, en base a las cuales se llevó a cabo el análisis de pérdidas de presión.

Para la recepción de los raspadores de manera segura y controlada se requieren instalar las trampas de recibo temporales mencionadas en el capítulo anterior, las cuales serán ubicadas en el los puntos finales de cada línea donde se unen con el cabezal de distribución.

Figura 54.

Punto de Recepción de los Raspadores

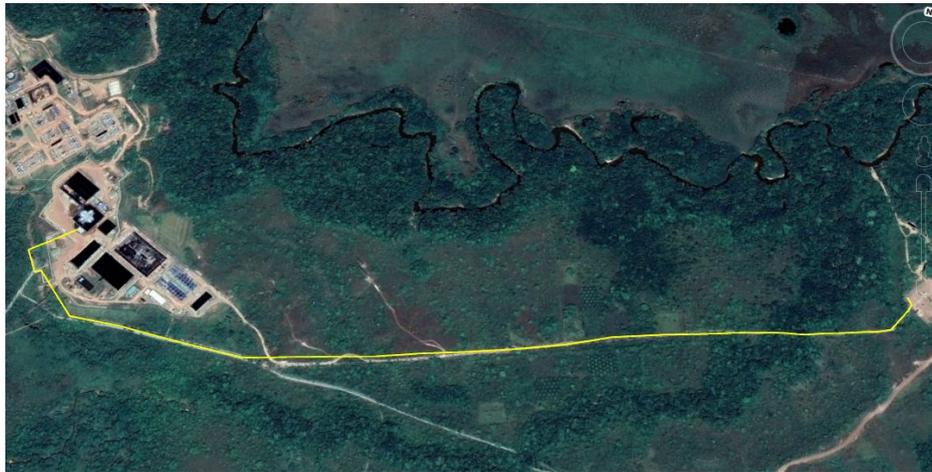


Nota. Esta figura muestra el punto de recepción en una vista de planta, y una vista panorámica donde se el punto en el cual se deberán adaptar las trampas de recibo.

Como se puede identificar en la figura, se requieren adaptar las facilidades para la instalación de las trampas temporales de recibo de los raspadores. Del mismo modo, en que las trampas buscan recibir de manera segura y controlada los raspadores, en este mismo lugar de recepción se deben adaptar y coordinar todos los recursos para el manejo adecuado y seguro de los fluidos y residuos recuperados durante la operación. A continuación, se evidencia el tramo que deberá recorrer el raspador desde la entrada hacia la salida:

Figura 55.

Recorrido del Raspador



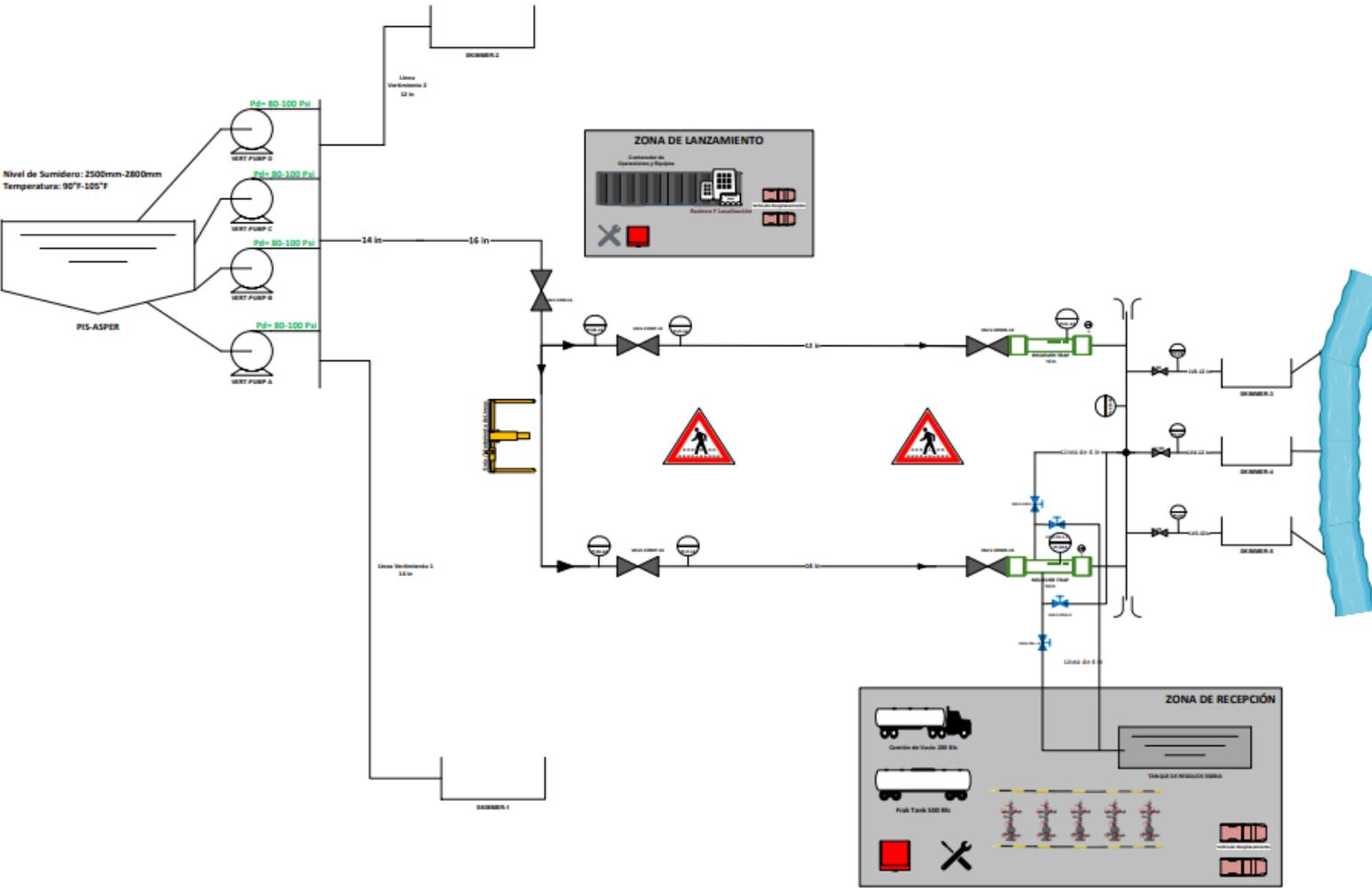
Nota. Esta figura muestra el recorrido que deberá hacer el raspador desde el punto de lanzamiento hasta el punto de recepción.

3.3.2 Diagrama de Diseño

En el diagrama de diseño construido se puede identificar las válvulas de seccionamiento presentes en las facilidades, denotándose como puntos de adecuación para la limpieza mecánica, equipos requeridos para llevar a cabo la operación como lo son las trampas de recepción de los raspadores, las bombas y línea de transferencia que representan el nodo inicial del sistema de vertimiento, hasta el nodo final representado por los skimmer de vertimiento.

Adicionalmente se encuentran denotadas las áreas de trabajo, con sus respectivos nombres, donde se ilustran los vehículos y maquinaria y equipo requerida para la operación, por ejemplo; el área de lanzamiento donde se debe contar con equipo de izaje, herramientas menores y conexiones hidráulicas y equipos menores. Para el caso de la zona de recepción se cuenta con equipos de almacenamiento de residuos, camión de vacío, conexiones hidráulicas para el clean out del sistema una vez se reciba el raspador. Cuenta con la información de diámetros de tubería, caudales y presiones de operación del sistema

Figura 56.
 Diagrama de Diseño Elaborado



Nota. Esta figura muestra el Diagrama de Diseño de la operación de Limpieza Mecánica de la Bifurcación del Sistema de Vertimiento de Rubiales.

3.3.3 Logística

Para llevar a cabo la operación se requiere primero realizar las siguientes actividades:

1. Inserción del raspador en la tubería: Para introducir el raspador dentro de cada una de las líneas es requerido un personal auxiliar de operaciones que se encargue de la desconexión de la válvula de seccionamiento, un equipo de izaje que permita levantar las cargas de los elementos desconectados y hacer los movimientos requeridos de la línea durante la instalación del raspador.
2. Se requiere de la instalación de indicadores de presión aguas arriba y aguas abajo de las válvulas de corte de la bifurcación del sistema de vertimiento para monitorear la presurización y empaquetado de la línea para el lanzamiento y recepción del raspador. Para lo cual se requerirá ciertos tipos de trabajos de soldadura y alistamiento de las facilidades.
3. Para la instalación de las trampas receptoras se requiere instalar una facilidad para la conexión de la misma en ambas líneas de la bifurcación. Para lo cual se requiere la construcción de **una brida de seccionamiento para la conexión de la trampa que posteriormente a la operación permita la restauración de las condiciones normales del sistema de vertimiento, e incluso permita la instalación de un elemento de control como lo es una válvula de corte en este punto, para el caso específico de la línea de 14 “**. Para estas adecuaciones se requiere de obras civiles y de ingeniería las cuales requieren de cierto trabajo e ingeniería a detalle que estará supervisado por una compañía que preste este servicio. El presente desarrollo está limitado a establecer el tipo de conexión requerida de acuerdo con los requerimientos de la trampa receptora, por lo cual se estimará como un costo de inversión para realizar la actividad.
4. En el punto de recepción de los raspadores se deben instalar los equipos para el almacenamiento de los productos residuales de la limpieza, tales como Frack Tanks, Camiones de Vacío, recipientes de almacenamiento, para el posterior transporte para su respectiva disposición. Para el montaje de esta locación se requiere la administración de los espacios, para determinar la ubicación adecuada para cada equipo requerido, en un orden funcional.

3.3.4 Consideraciones del Proceso

De acuerdo con el contexto planteado en los anteriores capítulos, es importante establecer las características del proceso de limpieza.

El tramo de bifurcación del sistema de vertimiento con líneas de 12" y de 14" con una longitud de 2147 m, permanecerá dentro de sus especificaciones de diseño y operación normal, temperatura, diámetro, capacidad caudal, y de presión, como se ha mencionado en los capítulos anteriores en las guías de control y ventanas operativas.

El proceso consiste en hacer envío de Polly Pig de media densidad, de un diámetro nominal aproximadamente 30% menor al diámetro nominal de la tubería para hacer inspección de la línea y evitar riesgo de atascamiento. Una vez realizada la corrida de inspección se incrementa el tamaño del raspador a un 15% inferior a la capacidad al diámetro nominal de la tubería, para posteriormente enviar un polly pig con gratas poliméricas para remover la película de depósitos al interior de la tubería. En el momento que se reciba la herramienta raspadora en la trampa de recibo se debe evaluar el estado de la herramienta para una próxima corrida la cual no debe presentar deformaciones o desgastes significativos. Cada uno de los raspadores debe contar con sistema de rastreo satelital para su localización en caso de un evento de atasco.

El raspador será propulsado con agua de vertimiento, utilizando las bombas de transferencia hacia vertimiento del sistema, las cuales proporcionan el caudal y la presión suficiente para el desplazamiento del raspador. Adicionalmente se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones para las variables de control

Presión de Operación: La máxima presión de operación es determinada por el fabricante del raspador, comúnmente los raspadores utilitarios no se ven afectados por la presión, de hecho, los incrementos de presión permiten que el raspador supere los depósitos dentro de la tubería. Se debe evitar que los incrementos de presión hagan que el raspador incremente su velocidad sin control hasta chocar con otro obstáculo, esto podría afectar la integridad mecánica del instrumento de limpieza.

Del mismo modo, a continuación, se pueden observar las presiones de lanzamiento, corrida y caudales comunes para distintos diámetros de líneas.

Figura 57.

Presiones Recomendadas para Operaciones de Limpieza

PIGGING PRESSURES & FLOWS

Recommended pressures and flow rates for pigging can be found in this section.

Pipe I.D.	Typical Differential Pressure in psi		Liquid Flow gpm		Gaseous Flow scfm	
	for Launching	for Running	3 fps	5 fps	5 fps	10 fps
2"	100-200	40-100	30	50	21	98
3"	100-150	35-85	70	100	46	172
4"	75-125	30-80	120	200	70	273
6"	50-100	30-75	250	450	134	498
8"	30-80	25-70	450	800	238	749
10"	30-60	25-50	750	1,250	317	957
12"	30-50	20-45	1,000	1,800	458	1,223
14"	20-50	15-40	1,400	2,500	518	1,665
16"	15-45	10-40	1,800	3,000	540	1,901
18"	15-40	10-30	2,000	4,000	683	2,406
20"	10-25	5-20	2,800	5,000	843	2,542
24"	10-25	5-20	4,000	7,000	1,214	3,661
30"	10-20	5-15	7,000	11,000	1,897	4,757
36"	10-20	5-10	10,000	16,000	2,732	6,850
40"	10-20	5-10	12,000	20,000	3,373	8,457
42"	10-20	5-10	13,000	22,000	3,718	9,324
48"	10-20	5-10	17,000	27,500	4,857	12,178

Nota. Esta figura muestra los típicos valores de presiones de lanzamiento de raspadores y operación. Tomado de: Drinkwater Products "Pigging Pressures & Flows". [En línea]. Disponible en: <https://www.drinkwaterproducts.com/pipeline-pigging-resources/suggested-pigging-pressures-flows> [Acceso: Abril, 2021].

Velocidad de Operación: Teniendo en cuenta que esta actividad de limpieza es de mantenimiento de una línea de proceso, la velocidad a la cual se trabajará será la velocidad del producto de la línea en operación normal. El trabajo de los raspadores es más efectivo cuando viaja a velocidad constante y no cuando viajan en constantes arranques y paros. Tampoco el trabajo es muy efectivo a altas velocidades. “Es importante notar que a medida que aumenta la velocidad, disminuye la presión diferencial y como es la presión diferencial la que fuerza los sellos contra la pared del tubo para hacer un trabajo efectivo, es lógico pensar que altas velocidades no rinden la efectividad óptima” [12].

A continuación, se muestran las cifras de velocidad de referencia utilizadas comúnmente en operaciones de limpieza, estas deben ser utilizadas para problemas en la operación.

Figura 58.

Velocidad de Operación Pig

Aplicación	Velocidad (Km/hr)
Construcción	5--8
Gas	8--20
Líquidos	3--15

Nota. Esta figura muestra los rangos de velocidad de operación en operaciones de limpieza. Tomado de: Introducción a las Herramientas de Limpieza de Ductos, 1ra ed, LIMPRO, No. 208 27 de septiembre, Guadalupe, México.

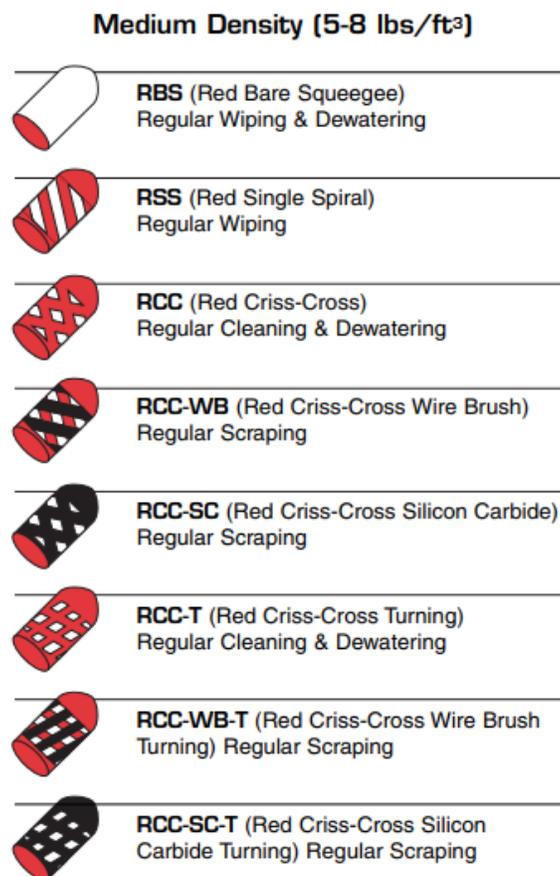
Temperatura: Para esta aplicación en específico la temperatura no es una limitante para el proceso, debido a que el material de los raspadores utilitarios comúnmente es poliuretano, el cual soporta temperaturas desde 0 a 80°C, lo cual no es impedimento debido a que la guía de control de temperatura establece que las condiciones de temperatura normales del agua del sistema de vertimiento oscilan entre 25-40°C.

3.3.5 Tren de Raspadores de Limpieza

Como se mencionó anteriormente, el raspador indicado para la operación de limpieza es un cerdo de espuma también llamado Polly Pig, el cual está elaborado en espuma de poliuretano. El tipo de raspador seleccionado debe cumplir la función de limpiar y raspar las paredes internas de la tubería que se encuentren con depósitos. Los adecuados para este tipo de operaciones son los raspadores serie Red, los cuales son de media densidad, (5-8 lbs/ft³), utilizados para limpiar y raspar.

Figura 59.

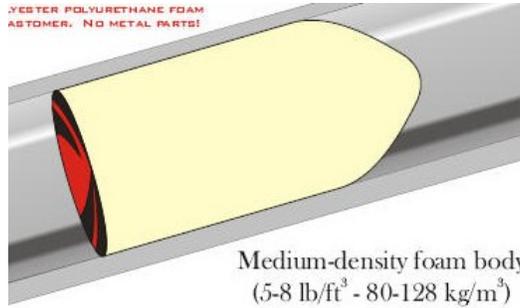
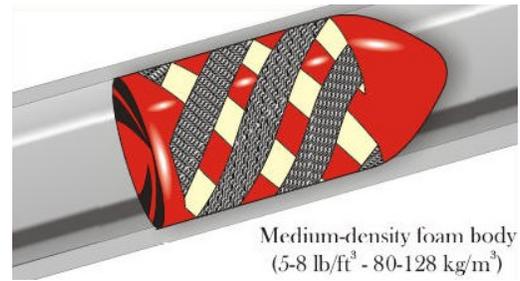
Tipos de Polly Pigs de Media Densidad



Nota. Tipos de raspadores de media densidad. Tomado de: Girard Polly-Pigs “Polly-Pigs Industrial Pipeline Cleaners”, Brochure. [En línea]. Disponible en: https://girardindustries.com/pdf/Brochure_Pollypig.pdf [Acceso: Abril, 2021].

Tabla 22.

Raspadores a Correr

Corrida	Pig	Tamaño y Características.
1		<p>RSB 8 in El raspador RBS es una herramienta básica utilizada por su flexibilidad y resistencia, puede soportar 5 psi/ft³. Es un dispositivo de celda abierta de espuma recubierto con poliuretano. <i>Cuenta con equipo de Pig tracking.</i></p>
2		<p>RCC 10 in El raspador RCC (Red line cruzado), es utilizado para operaciones en tuberías de longitud media, en las cuales se requiere mayor resistencia a la abrasión. El raspador sigue contando con propiedades elásticas, construcción de celda abierta y es ideal para superficies rugosas. <i>Cuenta con equipo de Pig tracking.</i></p>
3		<p>RCC-WB 10 in El raspador RCC-WB (Red Line Con Grata), es utilizado para tramos de longitud medios, en los cuales se requiere una superficie abrasiva para remover depósitos al interior de una tubería. Es recomendable estudiar previamente casos en los cuales se deba atravesar reducciones y/o accesorios considerables para evitar eventos in esperados. <i>Cuenta con equipo de Pig tracking.</i></p>

Nota. Esta tabla muestra los tres tipos de lanzadores a utilizar durante la operación de pigging. Elaboración propia. Imágenes Tomadas de: Floussa Suministros y Servicios para la Industria de Proceso.

Teniendo en cuenta que son dos líneas en las cuales se debe correr un raspador una de 12 in y otra de 14 in, para la corrida final de la línea de 14 in, se puede considerar introducir un raspador de mayor diámetro, teniendo en cuenta que es una línea de mayores dimensiones, esto se determinará a partir del monitoreo de la presión de la línea y el monitoreo de material removido durante las corridas iniciales.

3.3.6 Trampas Receptoras

Como se muestra en los diagramas de proceso suministrados y diagrama del diseño de la operación, las líneas de la bifurcación cuentan con válvulas de corte o seccionamiento en su externo inicial o nodo de entrada en el caso específico de la simulación, a través de las cuales se plantea introducir los raspadores. Por lo cual, se requiere únicamente de trampas receptoras. De acuerdo con el planteamiento de la alternativa de Limpieza Mecánica, la opción de trampa que se plantea utilizar, son trampas de recepción removibles portátiles, la cuales permiten la recepción del raspador de limpieza de manera segura y controlada.

Figura 60.

Trampas Removibles Temporales



Nota. Esta figura muestra las trampas temporales para la operación de pigging. Elaboración propia. Imágenes Tomadas de: Inpipe Products “Portable Pig Launchers”, Brochure. [En línea]. Disponible en: <https://www.inpipeproducts.com/product/portable-pig-launchers/> [Acceso: Abril, 2021].

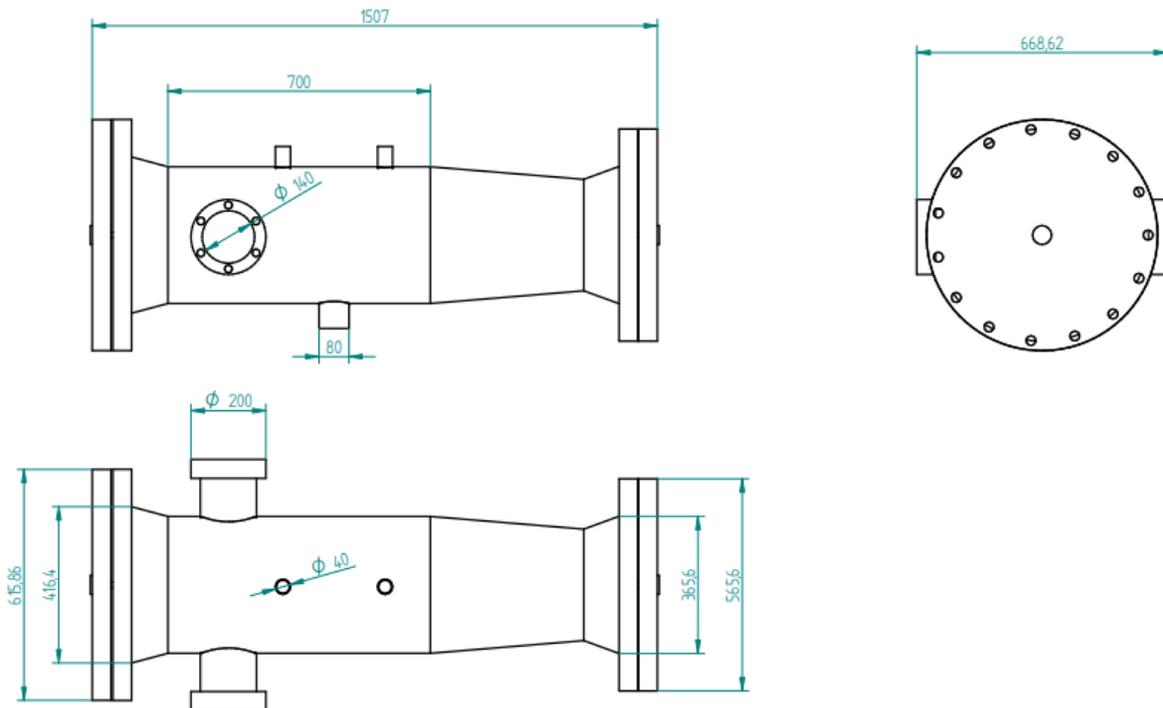
Teniendo en cuenta la recomendación de INPIPE PRODUCTS, las trampas temporales son una alternativa para la aplicaciones donde las operación de limpieza no es frecuente, donde no se cuenta con el espacio suficiente ni es fácil adaptar una facilidad de marraneo permanente, adicionalmente que puede ser utilizada en tramos de línea de longitud media que su presión de operación no sea mayor a 362 psi, y que se encuentra en

tamaños disponibles hasta 24 in, esta es la herramienta planteada para llevar a cabo la recepción del raspador.

Se elaboró un plano a escala de la trampa de receptora en la cual se pueden identificar las conexiones recomendables para la presurización y despresurización del barril, y adicionalmente a través de los cuales, en la trampa receptora, se drenará el producto cuando se esté llevando a cabo el desplazamiento de fluido y operación de limpieza. Adicionalmente cuenta un indicador de paso del raspador, una vez el raspador haya llegado a este punto se activará dando la señal que el raspador ya se encuentra en el barril receptor, esto con el fin de prevenir la apertura precipitada de la trampa receptora. Este diagrama plano se puede encontrar en los anexos del documento.

Figura 61.

Plano Trampa Receptora



Nota. Esta figura muestra el plano elaborado con las dimensiones planteadas para la trampa receptora.

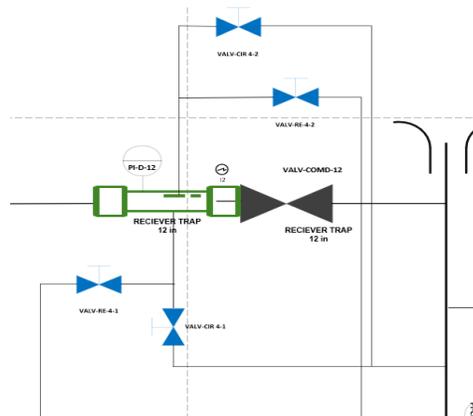
3.3.7 Sistema de Recuperación de Residuos

De acuerdo con el diseño de la trampa receptora del raspador, esta cuenta con dos threadolet, que funcionan como puntos de circulación para el control de flujo y presión de la trampa receptora. En base a esto y teniendo en cuenta que el objetivo es circular aproximadamente el 80% de la capacidad volumétrica de la tubería hacia los Skimmer y el restante 20% alinearlos hacia los tanques de recolección de residuos, es necesaria la implementación de líneas de flujo que conecten con el cabezal de distribución del sistema de vertimiento, y que de igual manera se permita alinear hacia el sistema de recolección de residuos.

Para lo anterior, se plantea la construcción de una facilidad simple para la circulación de fluido y recepción de los residuos, y adicionalmente sean ajustables para ambas trampas de recepción, la de 12 in y la de 14 in, teniendo en cuenta que las conexiones disponibles se plantean de las mismas características (4in de conexión roscada). Dichas facilidades consisten en que la línea de flujo de cada una de las conexiones cuente con un tramo de línea hacia los tanques de recepción de residuos y adicionalmente cuente con válvulas dos válvulas de corte de 4in las cuales permitirán derivar una línea que conecte hacia el cabezal de tubería y así cambiar la alineación una vez se haya desplazado el volumen requerido y se planea hacer la recepción del cerdo, y consigo los residuos productos de la limpieza. A continuación se muestra el esquema planteado:

Figura 62.

Configuración Sistema Propuesto Manejo de Fluidos



Nota. Esta figura muestra la configuración propuesta para el manejo de fluidos y residuos.

3.3.8 Procedimiento Preliminar Operación de Limpieza.

Lanzamiento del Raspador

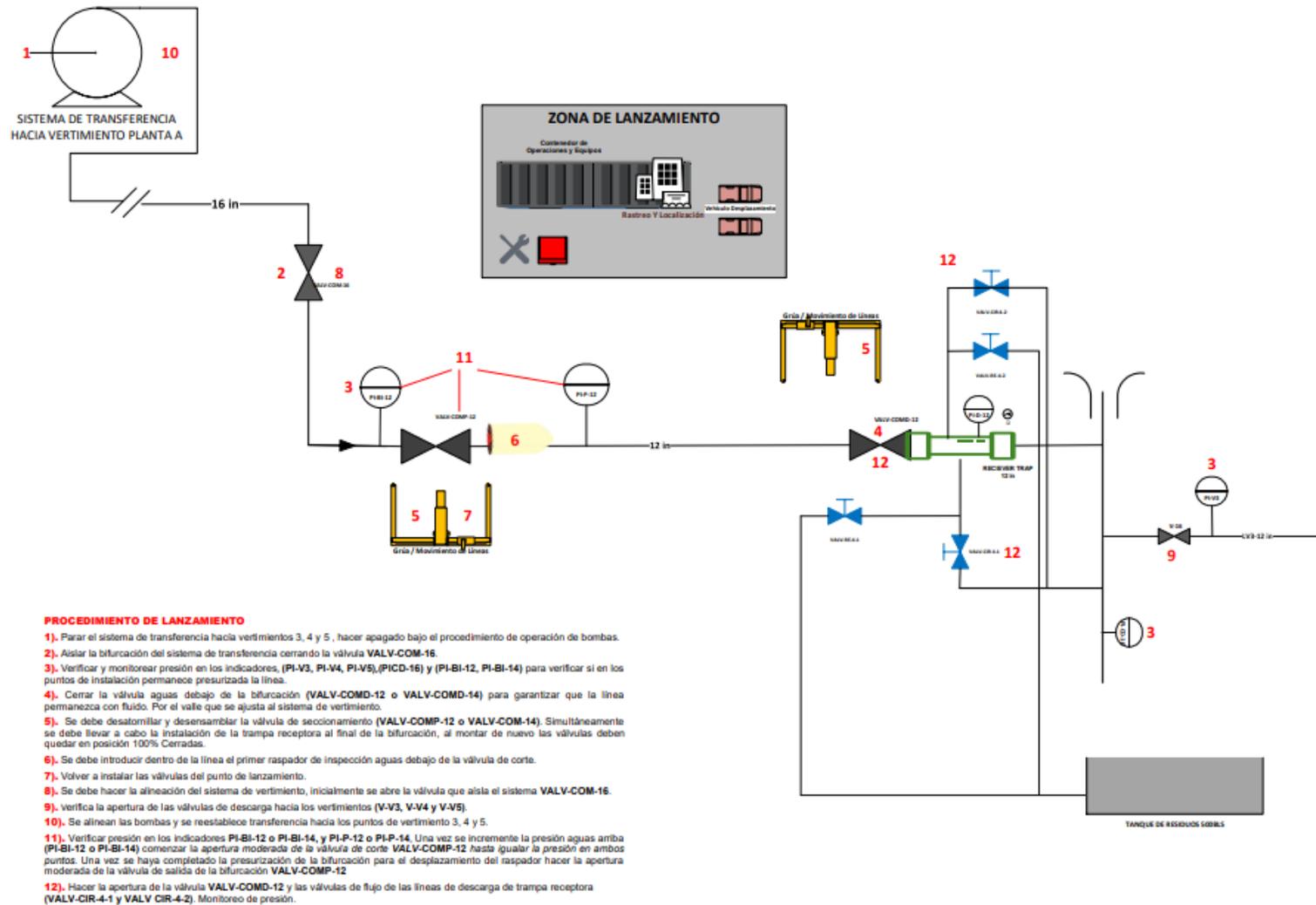
- Una vez lista toda la logística, y estén coordinados todo el equipo de operaciones, se debe asegurar que no haya transferencia de fluidos hacia los tres puntos de vertimiento (C, D y E). Seguir el procedimiento de parada del sistema de vertimiento.
- Se debe aislar la bifurcación con la válvula de corte **VALV-COM-16** en el tramo final de la línea de 16 antes de la bifurcación, para prevenir el paso de fluidos por cualquier circunstancia durante las operaciones de instalación de los equipos requeridos para la limpieza.
- Después de haber aislado el sistema se debe hacer monitoreo de presión en los indicadores del cabezal de distribución (**PICD-16**), en los indicadores de los ramales de vertimiento (**PI-V3, PI-V4, PI-V5**), y en los puntos de lanzamiento (**PI-BI-12, PI-BI-14**), para identificar si la línea permanece empaquetada en estos puntos cercanos a donde se realizará la instalación del raspador y la trampa receptora.
- Se debe cerrar la válvula aguas debajo de la bifurcación (**VALV-COMD-12 y VALV-COMD-14**) para garantizar que la línea permanezca con fluido, tan pronto se aisle la bifurcación. Debido a que el punto más alto es al inicio de la bifurcación.
- Se debe desatornillar y desensamblar la válvula de **seccionamiento (VALV-COMP-12 o VALV-COM-14)** según se esté haciendo la operación. Se debe introducir dentro de la línea el primer raspador de inspección aguas debajo de la válvula de corte para evitar el atasco del raspador en la válvula, una vez este haya sido introducido, se debe volver a instalar la válvula y atornillar con el torque requerido para la operación normal. La válvula debe instalarse en posición **100% cerrada**.
- Simultáneamente se debe llevar a cabo la instalación de la trampa receptora al final de la bifurcación. Teniendo en cuenta que previamente las válvulas de corte de la descarga (**VALV-COMD-12 y VALV-COMD-14**), fueron cerradas para evitar el vaciado total de la bifurcación, probablemente la parte del valle del tramo contenga agua de vertimiento, se debe desmontar la línea cuidadosamente y con vigilancia constante de la presión de los indicadores aledaños. Adicionalmente se debe instalar la facilidad para el drenaje de las borras generadas durante la operación de limpieza.

Una vez instalada la trampa, se deben montar las válvulas mencionadas anteriormente en **posición 100% cerradas, y se deben bloquear.**

- Cuando se hayan terminado las instalaciones y estén listos todos los equipos requeridos para la limpieza y el manejo de fluidos, se debe hacer el comisionamiento de las instalaciones realizadas y el sistema de vertimiento previamente a la alineación.
- Se debe hacer la alineación del sistema de vertimiento, inicialmente se abre la válvula que aísla el sistema **VALV-COM-16**, se verifica la apertura de las válvulas de descarga hacia los vertimientos (**V-V3, V-V4 y V-V5**), donde se transferirá el fluido desplazado por el raspador.
- Se alinean las bombas y se reestablece transferencia hacia los puntos de vertimiento C, D y E.
- Verificar presión en los indicadores de presión aguas arriba y abajo de la válvula de lanzamiento (**PI-BI-12 o PI-BI-14, y PI-P-12 o PI-P-14**).
- Una vez se incremente la presión aguas arriba (**PI-BI-12 o PI-BI-14**) comenzar la **apertura moderada de la válvula de corte VALV-COMP-12 hasta igualar la presión en ambos puntos.** Se presume que esta ecualización de presión se conseguirá antes de la apertura total de la válvula ya que el tramo de la bifurcación permanece lleno debido a que se cerró la válvula de la salida de la bifurcación.
- Una vez se haya completado la presurización de la bifurcación para el desplazamiento del raspador hacer la apertura moderada de la válvula de salida de la bifurcación **VALV-COMP-12**, para conseguir el diferencial de presión requerido para el movimiento del raspador a una velocidad controlada.
- Hacer la apertura de la válvula **VALV-COMD-12** y las válvulas de flujo de las líneas de descarga de trampa receptora (**VALV-CIR-4-1 y VALV CIR-4-2**)
- Se debe mantener monitoreo constante a las lecturas de presión y a las señales de localización del equipo de Pig Tracking.

Figura 63.

Diagrama Procedimiento de Lanzamiento



Nota. Esta figura muestra el diagrama con el procedimiento para el lanzamiento del raspador en la operación de limpieza.

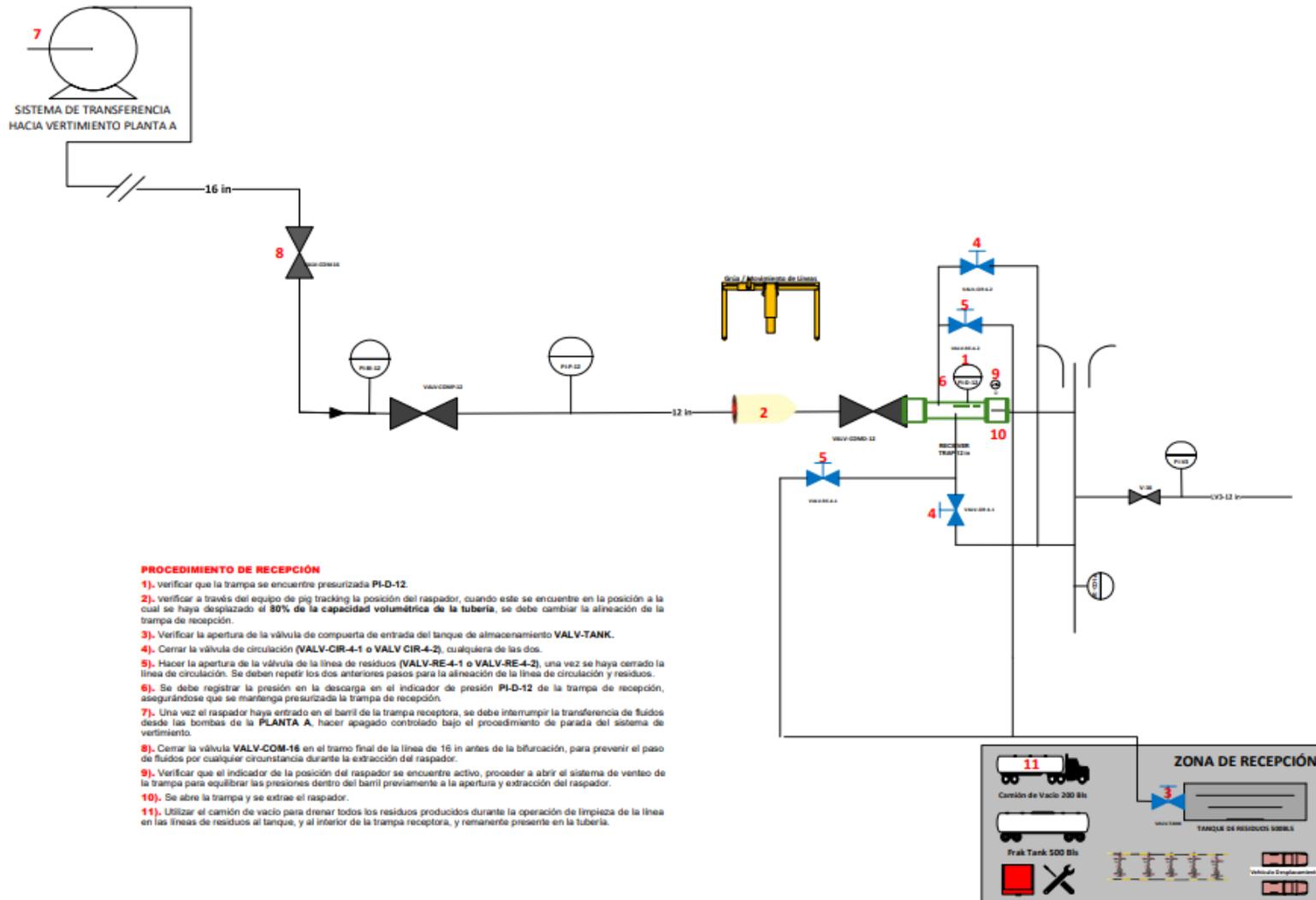
Recepción del Raspador

- Inicialmente para la recepción del raspador, se debe verificar que la trampa se encuentre presurizada **PI-D-12**.
- Se debe verificar a través del equipo de pig tracking la posición del raspador, cuando este se encuentre en la posición a la cual se haya desplazado el **80% de la capacidad volumétrica de la tubería**, se debe cambiar la alineación de la trampa de recepción.
- Verificar la apertura de la válvula del tanque de recolección de residuos. Cerrar la válvula de circulación (**VALV-CIR-4-1 o VALV CIR-4-2**), cualquiera de las dos.
- Hacer la apertura de la válvula de la línea de residuos (**VALV-RE-4-1 o VALV-RE-4-2**), una vez se haya cerrado la línea de circulación. Se deben repetir los dos anteriores pasos para la alineación de la línea de circulación y residuos.
- Se debe registrar la presión en la descarga en el indicador de presión **PI-D-12** de la trampa de recepción, asegurándose que se mantenga presurizada la trampa de recepción.
- Una vez el raspador haya entrado en el barril de la trampa receptora, se debe interrumpir la transferencia de fluidos desde las bombas de la PLANTA A, hacer apagado controlado bajo el procedimiento de parada del sistema de vertimiento.
- Cerrar la válvula **VALV-COM-16** en el tramo final de la línea de 16 in antes de la bifurcación, para prevenir el paso de fluidos por cualquier circunstancia durante la extracción del raspador.
- Verificar que el indicador de la posición del raspador se encuentre activo, proceder a abrir el sistema de venteo de la trampa para equilibrar las presiones dentro del barril previamente a la apertura y extracción del raspador.
- Se abre la trampa y se extrae el raspador.

NOTA: Los anteriores procedimientos de lanzamiento y recepción de raspadores deben ser ejecutados para cada una de las corridas que se vayan a realizar, aplicando para ambas líneas de la bifurcación. El equipo de manejo de residuos será el mismo para la recepción en ambas trampas de recepción la de 14 in y la de 12 in.

Figura 64.

Diagrama Procedimiento de Recepción



Nota. Esta figura muestra el diagrama con el procedimiento para la recepción del raspador en la operación de limpieza.

3.3.9 Análisis Financiero.

Hasta el momento se ha realizado un análisis técnico y operacional de los requerimientos para la operación de limpieza mecánica para la optimización del sistema de vertimiento de Campo Rubiales. En este apartado se identificarán los costos requeridos para llevar a cabo esta operación, adicionalmente donde se evaluará la viabilidad del proyecto bajo los indicadores de evaluación de proyectos VPN y Relación Beneficio-Costo. El análisis económico se realiza para la alternativa seleccionada, acorde con la propuesta realizada.

Costos: A continuación, se enlista el equipamiento requerido y los costos asociados al trabajo de limpieza mecánica:

Tabla 23.

Requerimientos de la Limpieza Mecánica

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo x Unidad (\$USD)	Costo Total (\$USD)
Camión de vacío 24hrs 120bbl	5	Día	\$ 260	\$ 1.300
Tractocamión con brazo hidráulico/ Camión grúa 2Ton	5	Día	\$ 312	\$ 1.560
Tarifa por uso de grúa	5	Día	\$ 3.108	\$ 15.540
Profesional III	5	Día	\$ 147	\$ 735
Especialista	5	Día	\$ 130	\$ 650
Vehículo con conductor 12Hrs	5	Día	\$ 246	\$ 1.230
Tarifa de tráiler	5	Día	\$ 225	\$ 1.125
Diferida por parada de vertimiento	5	Día	\$ 204.160	\$ 1.020.800
Raspadores RBS	4	C/U	\$ 120	\$ 480
Raspadores RCC	2	C/U	\$ 150	\$ 300
Equipos de rastreo y localización	1	C/U	\$ 5.000	\$ 5.000
Equipos de comunicación	2	C/U	\$ 1.500	\$ 3.000
Herramientas varias	N/A	C/U	\$ 250	\$ 250
Movilización de equipos	60	Km	\$ 19	\$ 1.140
Sistema de flujo	1	Semana	\$ 1.000	\$ 1.000
Trabajos de instalación en campo	1	Semana	\$ 10.000	\$ 10.000
Trampas lanzadoras portátiles 12in	1	Semana	\$ 1.000	\$ 1.000
Trampas lanzadoras portátiles 14in	1	Semana	\$ 1.500	\$ 1.500
Frack Tank/ Cash tank 500bbl	1	Semana	\$ 3.700	\$ 3.700
Total, general				\$ 1.070.310

Nota. Esta tabla muestra los equipos requeridos para la operación de la Limpieza Mecánica, y su valor estimado.

Se estima que para la operación se requiere hacer una parada del sistema de vertimiento para evitar que los ramales de vertimiento se contaminen con la posible borra que se genera durante las corridas de los raspadores. Teniendo en cuenta que estas actividades se realizan bajo intermitencia, se plantea llevar a cabo las operaciones de limpieza mecánica durante 5 días seguidos, aunque se mantenga la alternancia en las operaciones, se consideran los costos operativos bajo todo el periodo establecido, teniendo en cuenta que los equipos son rentados bajo modalidades de contratación específicas con tiempos definidos. Del mismo modo se considera que los costos de operación asociados a la diferida de producción producto de la parada de los puntos de vertimiento C, D y E serán asumidos por los cinco días de operación, como factor de seguridad para la evaluación del proyecto, lo cual significa con un corte de agua de 98% obtendremos una diferida aproximada de **3520 BOPD**. De igual manera los costos operacionales representarán netamente lo requerido para la operación del tratamiento del proceso de agua, **20 COP / BTPD**, teniendo en cuenta que el análisis se está realizando para el proceso de agua.

Adicional a esto se consideró un promedio en el precio del crudo de referencia Brent de **58 \$USD/bbl** para el presente año según la fuente: Fitch Ratings.

Ingresos: En cuanto a los ingresos para el flujo de caja para la evaluación del proyecto, se considera que los ingresos netos para la operación del caso, estarán representados netamente por la capacidad volumétrica optimizada en el sistema de vertimiento, es decir la producción de **80 BOPD**.

Tabla 24.

Información de Producción acorde a la Optimización

✓ Barriles a recuperar:	80 Bbl/Day
✓ Precio de Referencia Brent:	\$ 58 USD/bbl
✓ Dolares x día	\$ 4.640 USD

Nota. Esta tabla muestra los valores que se estiman recuperar una vez realizada la operación de limpieza.

Se realizó un análisis económico utilizando los principales indicadores de evaluación de proyectos. Inicialmente se planteó un horizonte de proyecto a 12 meses, en los cuales se tuvo en cuenta la cantidad de barriles (**80 BODP**) a recuperar con el trabajo de limpieza mecánica como ingresos operacionales, basándonos en el precio promedio del crudo de referencia de Brent (**\$58 USD**). Por otro lado, los egresos operacionales están basados en los costos operacionales que debe cubrir el campo asociados al tratamiento de agua, los cuales tienen un valor de **20 COP** pesos por barril por barril vertido, como se ha mencionado previamente, lo cual significan (**649 \$ USD/mes**), ya que es el tratamiento de **4000 BOPD** recuperados. Adicional a esto tenemos una tasa de interés de oportunidad (TIO) establecida de 10%.

Tabla 25.

Resultados de Evaluación Financiera

INDICADORES FINANCIEROS			
Tiempo	1 año	2 años	5 años
TIO	10%	10%	10%
VA	\$ 944.046,21 USD	\$ 1.244.848 USD	\$ 1.380.963 USD
VPN	-\$ 126.263,79 USD	\$ 174.538 USD	\$ 310.653 USD
TIR	8%	12%	13%
VPR Ingresos VNA	\$ 948.465,90 USD	\$ 1.250.676,3 USD	\$ 1.387.428 USD
VPR Egresos VNA	\$ 1.074.729,69 USD	\$ 1.076.138 USD	\$ 1.076.775 USD
RB/C	0,883	1,162	1,289

Nota. Esta tabla muestra los resultados obtenidos en los 3 distintos escenarios planteados, con sus respectivos indicadores de evaluación de proyectos cada uno.

Se evaluaron tres casos a diferentes periodos de duración donde obtenemos que el índice beneficio-costo en el primer año nos indica que los costos son mayores que los beneficios y adicionalmente el VPN es negativo, indicando que el proyecto no es rentable para este periodo de duración, sin embargo, lo más usual es un planteamiento de proyectos con periodos de duración superiores, como podemos evidenciar en los siguientes dos casos de 2 y 5 años respectivamente obtenemos un índice beneficio-costo mayor a 1, esto nos indica que los beneficios son mayores a los costos por tanto el proyecto es rentable. Adicionalmente es importante considerar que, dentro de los costos de inversión requeridos para la ejecución del proyecto, se está considerando el valor asociado a la

diferida de la producción por parada del vertimiento, por lo cual para cualquier alternativa implementada se inflaría su costo en este valor.

Se plantea un escenario de evaluación financiera del proyecto en el cual se considera que la operación de limpieza se ejecutará durante la temporada de verano entre los meses (enero-abril) durante los cuales se hace la parada del sistema de vertimiento, debido a la reducción del cauce y nivel del caño donde se verte de manera controlada, esto con el fin de evitar sobre pasar los límites establecidos del agua del caño establecidos en la licencia ambiental. En este caso se garantiza el nivel de la piscina de vertimiento PIS-VER para poder circular fluido a través de las dos líneas de flujo de la bifurcación y poder transportar el raspador impulsado con agua de vertimiento. Por lo anterior, todas las operaciones de puesta a fuera de línea para mantenimiento mayor de los equipos asociados al sistema de vertimiento durante la suspensión del vertimiento, se llevarán a cabo una vez se haya finalizado la limpieza mecánica, esto con el fin de para garantizar la transferencia de fluido.

En este escenario, no se tiene en cuenta la diferida de producción asociada a la parada del vertimiento para el financiamiento del proyecto debido a que ya se encuentra asociado a los costos de operación del campo anualizados, teniendo en cuenta que para todos los años en esta temporada se suspende el vertimiento. Acorde con lo anterior, este escenario de evaluación financiera es bastante favorable debido a que no cuenta con la carga de la diferida de producción, por lo cual los costos de inversión se reducen en \$ 1.020.800. De esta manera el proyecto se hace financieramente rentable con todos los indicadores de evaluación financiera de proyectos positivos, en un periodo de duración único de un mes, ya que los ingresos operacionales conseguidos por la recuperación de los 80 BOPD al precio del barril considerado \$58 USD duplican el valor de la inversión en tan solo un periodo de operación de 1 mes, y del mismo modo los costos operacionales asociados al sistema de tratamiento de agua se ven reducidos teniendo en cuenta que este no se encuentra operativo.

Tabla 26.

Evaluación Financiera sin Diferida

INDICADORES FINANCIEROS	
Tiempo	1 mes
TIO	10%
VA	\$ 125.955,77 USD
VPN	\$ 76.445,77 USD
TIR	180%
VPR Ingresos VNA	\$ 126.545,45 USD
VPR Egresos VNA	\$ 50.099,68 USD
RB/C	2,53

Nota. Esta tabla muestra los resultados de la evaluación financiera sin diferida.

Adicionalmente, es importante recalcar, que esta evaluación financiera preliminar se elabora bajo las premisas, que se mantienen constantes los costos de operación del sistema de tratamiento de agua, que el precio promedio para todos los periodos se mantiene constante, que la producción del campo se mantendrá para satisfacer la capacidad volumétrica del sistema de vertimiento, no se toman en cuenta depreciaciones de maquinaria y equipo, ni incrementos ni reducciones porcentuales asociadas a pagos asociados a la operación que podrían afectar al flujo de caja.

El análisis financiero es bastante conservador, teniendo en cuenta que el proyecto se auto financia con los ingresos operacionales por la optimización de la capacidad volumétrica.

4 . CONCLUSIONES.

De acuerdo con la información recopilada y los datos históricos de vertimiento, se identifica que el sistema de vertimiento presenta una pérdida de capacidad volumétrica desde el año 2017, y no se ha conseguido reestablecerla hasta el día de hoy. Luego de la última parada del sistema de vertimiento se han mantenido una pérdida de capacidad volumétrica que oscila entre los 4000 BWPD (Barriles de Agua vertida por Día), distribuida en los puntos de vertimiento C, D y E. Además, también que a pesar de los mantenimientos correctivos en los equipos de sistema de vertimiento no han conseguido re establecer la capacidad volumétrica de diseño a 300 KBWPD.

Se puede concluir que el sistema de vertimiento se encuentra bien dimensionado ya que en el caso base de simulación planteado con el modelo de Hazen-Williams, con un factor de fase simple "C" de 130 (Promedio para tuberías nuevas o en buen estado), se obtuvo que los 5 puntos de vertimiento cumplían con su capacidad de diseño de 60KBWPD. Adicionalmente se pudo evidenciar que el punto de vertimiento E es aquel que presenta mayores pérdidas de presión llegando con 18 Psig al vertimiento en el caso inicial de simulación.

Según el caso de simulación bajo el cual se representa la prueba de las bombas, se puede decir que la pérdida de capacidad del sistema de vertimiento está asociada a pérdidas de presión adicionales en el tramo de la bifurcación, debido a que se evidencia un diferencial de presión entre el caso de simulación inicial y el representativo de la prueba de las bombas en el punto de distribución en los ramales de vertimiento de 22 Psig y 49.82 Psig respectivamente, obteniendo una diferencia de presión en este nodo de referencia entre ambos escenarios de 28 Psig. Dichas perdidas de presión probablemente están siendo generadas por la reducción del diámetro interno efectivo de flujo al interior de la tubería en el tramo de la bifurcación por la posible precipitación de sólidos.

Los factores de fase simple "C" (100-90, 60) utilizados para el caso de simulación que representa el actual sistema de vertimiento, confirman que el sistema presenta

restricciones anormales que causan pérdidas de presión adicionales en las líneas de flujo de la bifurcación. Haciendo estas modificaciones en los factores “C” en algunos tramos de la línea se consigue la reducción de capacidad volumétrica en los puntos de vertimiento, lo que representa las condiciones actuales.

Los casos de simulación de efectividad de la alternativa, demuestran que incrementando el área de flujo en un 8% respecto al caso que representa la actualidad, llevado a un factor de fase simple “C” de 110, se conseguirá optimizar el sistema de vertimiento restableciendo su capacidad a 300KBWPD, lo cual indica que no se requerirá una eficiencia de remoción del 100% para conseguir el caudal requerido. Del mismo modo las demás sensibilidades planteadas indican que se optimiza el sistema partiendo que la tubería nueva se representa por el factor C de 140.

Según los resultados del análisis hidráulico, se mostró que bajo los escenarios propuestos de simulación se consigue optimizar la capacidad volumétrica del sistema de vertimiento a 300KBWPD, por lo cual se planteó la revisión de tres alternativas para la solución al problema de las pérdidas de presión adicionales generadas en el sistema; Limpieza Química, Limpieza Mecánica y re Construcción del tramo de la bifurcación, las cuales fueron analizadas en relación a la aplicabilidad del caso de estudio.

No se puede concluir si la variación en la concentración de cloruros de 50 mg/L sea significativa tratándose de un dato puntual, teniendo en cuenta que los demás parámetros no evidencian un cambio significativo (+/-5 mg/L), además, por el lado de la variación del parámetro TDS no se asocia directamente a la deposición de sólidos ya que este parámetro podría verse influenciado por la interacción y propiedades fisicoquímicas del medio, propiedades que se desconocen ya que el sistema de vertimiento lleva en funcionamiento más de 15 años, y no se han llevado a cabo trabajos de inspección o mantenimiento a las líneas durante este periodo. Por lo anterior se considera que la alternativa de limpieza química tiene asociada un alto grado de riesgo e incertidumbre para su implementación.

La alternativa de limpieza mecánica favorece los tiempos de implementación y la reducción del riesgo en la operación teniendo en cuenta que se plantean 3 corridas de raspador, iniciando con un diámetro 30% menor al nominal de la tubería, reduciendo el riesgo por atascamiento o pérdida de integridad de la tubería.

La alternativa de reconstrucción de la bifurcación es la opción más costosa con un valor de inversión de aproximadamente \$5'000.000 USD, y en el orden establecido en el árbol de decisión es la última alternativa a considerar de acuerdo con el flujo de trabajo.

Teniendo en cuenta las apreciaciones sobre cada una de las alternativas y de acuerdo con la metodología de matriz de selección planteada, la mejor alternativa para la optimización del sistema de vertimiento fue la limpieza mecánica, obteniendo una calificación de 36 puntos ubicando la opción en un rango medio de riesgo de acuerdo a la metodología establecida, y estando más cerca a un riesgo bajo.

El diagrama de diseño del proceso y el procedimiento preliminar de lanzamiento y recepción creados, identifican los requerimientos para llevar a cabo la operación de limpieza mecánica de las líneas de la bifurcación del sistema de vertimiento de 12in y 14in respectivamente.

La evaluación económica preliminar de la alternativa seleccionada concluye que es un proyecto viable proyectándose con un periodo de duración de 2 años, pagando la diferida de producción durante la operación obteniendo los siguientes números; VPN \$ 174.538 y una R B/C de \$ 1,162. Es importante tener en cuenta que el proyecto asume la diferida de la parada de vertimiento, y contará como único ingreso operacional el volumen optimizado, 80 BOPD.

De acuerdo con el segundo escenario financiero planteado, la mejor opción es ejecutar la alternativa seleccionada durante la suspensión del sistema de vertimiento debido a que en este caso el proyecto no debe asumir la diferida por la parada del vertimiento, y se obtienen números bastante favorables; VPN \$ 76.445,77 y una R B/C de \$ 2,53.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] M. Stewart, *Surface Production Operations Facility Piping and Pipeline Systems*. 1ra ed. 225 Wyman Street, Waltham, MA 02451, USA: Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier, 2016.
- [2] Limpieza química de tuberías, 1ra ed. Control Ambiental España Sur SLC, Torre ciega (Cartagena) España. 2000 [En Línea] Disponible en: http://data.europeana.eu/item/2022720/lod_oai_idus_us_es_11441_34580_ent0.
- [3] Actualización Filosofía de Operación y Control. Ingeniería y Estudios de Análisis de Integridad del Activo Rubiales, 1ra ed, Ecopetrol S.A, Bogotá Colombia Cra. 13 #36-24, 2018.
- [4] Manual de Descripción de Procesos de la Unidad Capítulo 3. Descripción detallada del Proceso Producción Facilidad Central De Procesamiento. Coordinación De Producción Rubiales, 1ra ed, Ecopetrol S.A, Bogotá Colombia Cra. 13 #36-24, 2019.
- [5] Manual de Descripción de Procesos de la Unidad Capítulo 4. Química y procesos unitarios producción Facilidad Central de Procesamiento. Coordinación de Producción Rubiales, 1ra ed, Ecopetrol S.A, Bogotá Colombia Cra. 13 #36-24, 2019.
- [6] Instructivo Operacional para el sistema de Aspersión y enfriamiento de la Piscina de Vertimiento," 1ra ed, Ecopetrol S.A, Bogotá Colombia Cra. 13 #36-24, 2020.
- [7] Manual para las Operaciones Generales de Producción en Campo Rubiales Documentos Operativos de Desarrollo y Producción Departamento de Producción Oriente, 1ra ed, Ecopetrol S.A, Bogotá Colombia Cra. 13 #36-24, 2017.
- [8] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 24 de diciembre de 2007. "RESOLUCIÓN NÚMERO (2355) Licencia Ambiental Campo Rubiales"
- [9] Mejora de Vertimientos Campo Rubiales, 1ra ed, Ecopetrol S.A, Bogotá Colombia Cra. 13 #36-24, 2019.
- [10] PipeSim Steady-State Multiphase Flow Simulator User Guide, 1ra ed, Schlumberger, Ac. 100 #1321, Bogotá Schlumberger, 2017.
- [11] Fung, G., Backhaus, W.P., McDaniel, S., and M. Erdogmus. "To Pig or Not to Pig: The Marlin Experience With Stuck Pig.", *To Pig or Not to Pig: The Marlin Experience With Stuck Pig*, pp 2-4. Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 2006. doi: <https://doi.org/10.4043/18387-MS> [Acceso: Abril, 2021]
- [12] Introducción a las Herramientas de Limpieza de Ductos, 1ra ed, LIMPRO, No. 208 27 de septiembre, Guadalupe, N.L. 67164, México.

ANEXO 1.

RECOMENDACIONES

De acuerdo con el desarrollo y resultados obtenidos en el presente trabajo, se proponen las siguientes recomendaciones para conseguir la optimización del sistema de vertimiento de campo Rubiales.

Se debe realizar una inspección de integridad de los tramos de la bifurcación, e incluso en los ramales de Vertimiento, para asegurar la integridad de las líneas. Es recomendable la inspección con herramientas de flujo magnético o transmisión de ondas sónicas. Las cuales permitan identificar fugas y del mismo modo obstrucciones en los tramos de la línea.

Se sugiere la instalación de indicadores de presión cada 300 metros en el tramo de línea desde el inicio de la bifurcación hasta el fin en el cabezal de descarga hacia los puntos de Vertimiento, esto con el fin de tener la posibilidad de hacer un registro de presiones a lo largo de la línea para identificar pérdidas de presión adicionales en la línea de flujo.

Realizar análisis fisicoquímicos de los parámetros del agua en el nodo de entrada del sistema y el nodo de salida del nodo en un periodo de tiempo específico, donde se garantice que se representa el cambio en los parámetros fisicoquímicos que se presentan en el proceso de vertimiento. Es importante definir el método de muestreo adecuado para el propósito que se requiere, y la adecuada metodología de análisis de la muestra, que permita identificar con certeza la precipitación de partículas en la tubería.

Es recomendable para el desarrollo de un tratamiento químico en la línea de vertimiento, la recolección de una muestra física del interior de la tubería, para poder analizar con precisión, la naturaleza de los sedimentos precipitados de presentarse, la naturaleza de los sólidos suspendidos identificados en los análisis fisicoquímicos y la cantidad, esto con el fin de poder recomendar una estrategia tratamiento químico para la limpieza de la tubería, que permita conseguir la optimización del sistema de vertimiento.

Contactar un proveedor de experiencia y reputación en este tipo de operaciones, que presente soporte técnico durante las operaciones, y además profundice en límites y condiciones operativas para llevar a cabo esta operación, pig tracking, sludge simulation, velocidades de corrida, tiempo de retención, monitoreo de presión, caudal y demás variables.

Establecer los criterios de evaluación de eficiencia de limpieza y del mismo modo la metodología de medición, sea con muestreo de fluidos, mediciones de presión o volumétricas, e inclusive considerar alternativas de inspección de tuberías para verificar que se haya limpiado el área de flujo de la tubería.

En cuanto al análisis financiero del proyecto se recomienda a la compañía elaborar un análisis más detallado en el cual se ajuste información tal como; el ahorro en costos de mantenimiento asociados al sistema de vertimiento (consumo de energía y recursos de estas actividades, reducción en el uso de productos químicos ineficientes, etc.), proyecciones de producción precisas acorde con los planes de desarrollo del campo, proyecciones de incremento porcentual en costos asociados a la operación del sistema de agua, depreciaciones, y ajustes que se consideren requeridos en el financiamiento. Todo lo anterior para elaborar un análisis financiero más preciso y acorde a la realidad del campo.