

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



EVALUACIÓN DE LAS LÍNEAS DE MANEJO DE SUSPENSIONES DEL
PROYECTO CONVERSIÓN PROFUNDA DE LA REFINERÍA
PUERTO LA CRUZ

Presentado por:

ANTONIO ALEJANDRO BEJARANO AGUILAR

Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como
requisito parcial para optar al título de:

INGENIERO QUÍMICO

Barcelona, Diciembre de 2010

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



EVALUACIÓN DE LAS LÍNEAS DE MANEJO DE SUSPENSIONES DEL
PROYECTO CONVERSIÓN PROFUNDA DE LA REFINERÍA
PUERTO LA CRUZ

ASESORES

Ing. Químico Arturo Rodolfo. M. Sc
Asesor Académico

Ing. Químico Vicente Rossi
Asesor Industrial

Barcelona, Diciembre de 2010

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



EVALUACIÓN DE LAS LÍNEAS DE MANEJO DE SUSPENSIONES DEL
PROYECTO CONVERSIÓN PROFUNDA DE LA REFINERÍA
PUERTO LA CRUZ

Jurado calificador

Ing. Químico Arturo Rodolfo. M. Sc
Asesor Académico

Ing. Quím. Yuvi Moreno, Esp
Jurado principal

Ing. Químico Lucas Álvarez, Ph, D
Jurado principal

Barcelona, Diciembre de 2010

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de Trabajos de Grado:

“Los Trabajos de Grado son exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del consejo de núcleo respectivo, el cual participará al consejo universitario”

DEDICATORIA

A Dios por ser mi protector y guía en cada una de las metas que me he propuesto.

A mis padres por ser los pilares fundamentales de mi formación, por inculcarme todos los principios y valores que me han llevado hasta donde estoy. Por fomentar en mí la actitud de firmeza ante cualquier obstáculo. Todo lo que soy y lo que seré se los debo a ellos. Este es mi primer triunfo, mi primera ofrenda para el gran cúmulo de alegría que quiero darles, por haberme educado para ser un hombre de bien, para ser hombre exitoso.

A mis hermanas por ser incondicionales conmigo, por cuidarme y por ser como son, lo mejor de este mundo.

A mi tía Elsa Aguilar por ser la base de toda mi carrera, por estar allí cuando más lo necesité, por darme siempre patrones de responsabilidad y ánimos para alcanzar mis metas. ¡Lo logramos! Y todo en gran parte gracias ti.

A Gabriela Rodríguez, por inspirarme a triunfar para nosotros, por levantarme y darme fuerzas cuando más lo necesité dándome paz y cordura, siendo mi punto de apoyo.

A todos mis familiares, porque me han brindado su compañía y han contribuido de manera significativa en este logro, a todos y muchos en especial les dedico este triunfo.

A mis abuelas Carmen Hernández y Sara Bravo, que desde el cielo se que deben estar sintiendo orgullosas de tener un nuevo nieto ingeniero. Atesoro cada una de sus enseñanzas porque hoy y siempre las tendré presentes.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la Virgen por cuidar de mí siempre.

A mi madre Magalys, por darme la educación, la vida y todo lo que tengo. No hay mejor madre que tú, eres única y sin igual, tu eres mi inspiración de fortaleza, no decaes ante nada, eres una luchadora y así me haces querer ser. Siempre voy hacia adelante, siempre por lo mejor para superarme, triunfando, pero siempre teniendo presente todo lo que me has enseñado. Tu amor es la brújula con la que siempre camino ¡TE AMO!

A mi padre, Antonio, por escucharme, por estar pendiente de mi, pero en especial te doy las gracias por cuestionarme, eso me ha servido para poder demostrarte lo que soy, que tengo un gran potencial y voy a seguir adelante, cosechando nuevos triunfos, para que siempre estés orgulloso de mi...

A mi hermana, Claudia Sarita, porque eres mi orgullo, mi ejemplo a seguir y la persona que me ha enseñado muchas cosas de la vida.

A mi hermana, Claudia Alejandra, que es lo más grande que yo tengo, nada se compara con el amor que siento por ti, todo lo que hago es para que te sientas orgullosa de mi y para ser un ejemplo para ti...

A mi tía, Elsa Aguilar, por darme palabras de aliento cuando más las necesite, por darme fuerza para levantarme y ayudarme a salir de todos mis problemas.

A Gabriela Rodríguez y toda su familia, por demostrarme todo el cariño que me tienen, por ser incondicionales conmigo y por darme la dicha y honor de poco a poco pertenecer a su familia.

A mi primo, Cristóbal Grau, por ser también uno de mis ejemplos, te agradezco el tiempo que haz dedicado para ayudarme y por hacerme el padrino de tu hermosa hija.

A mi tutor académico el profesor Arturo Rodulfo, por enseñarme el valor de la ingeniería química, por dejarme ser su alumno, preparador y asesorado, es una de las personas que recordare con más aprecio, son invaluable todos los conocimientos que nos impartió, la manera en la que se hace entender y la forma en la que nos aconseja corresponde más a un amigo y así lo considero yo... Gracias también por los miles de comandos de Word que me enseñó, sé que me serán de mucha ayuda.

A mis tutores industriales, los ingenieros Vicente Rossi y Jesús Gil por tomar parte de su valioso tiempo y dedicármelo, por toda su colaboración y los conocimientos e ideas que compartieron conmigo.

Al personal de PDVSA Guaraguao, las ing. Indira Fuenmayor y Rizzia Ramos por darme su confianza, aconsejarme sabiamente y compartir su experiencia y conocimientos. De igual manera a Almari Avila y Diliana Díaz personas valiosas de la empresa, siempre dispuestas a colaborar. A todas ellas gracias por hacer de mi trabajo de grado una excelente experiencia, por hacerme sentir apoyado en todo momento.

A mis amigos, Jet, Blanco, Roberth, Marybeth, Fergie, Moira, Yaneska, María Fernanda, Mafe, Diego, Carlos, Aleysa, Yanais, Amin, Sonia, Edgar, Pedro, Nahir, Manuela, Javier, Kenny, Mariana, Karline, Melly, Carlos Álvarez, Ivanna y a todos

aquellos que de alguna u otra forma compartieron conmigo experiencias e hicieron que la universidad fuese un sitio mejor, les doy las gracias y les deseo todo lo mejor...

A todas aquellas personas que aunque no las nombré son importantes para mí y que contribuyeron con mi formación académica y personal.

¡GRACIAS A TODOS!

RESUMEN

Se evaluaron las líneas de manejo de suspensiones de la unidad 79 (*Residue Work-up*) del proyecto conversión profunda de la refinería Puerto La Cruz, PDVSA. En este estudio se analizaron los regímenes de flujo en las líneas de transporte de fluidos bifásicos con suspensiones, para determinar la velocidad crítica de sedimentación, por medio de la búsqueda de ecuaciones aplicables a suspensiones (*slurry*) que cumplan con los rangos de las propiedades de flujo establecidas para la unidad estudiada. Por medio de las metodologías de cálculo desarrolladas por las empresas Weir, Flygt, Fluor Daniel y Foster Wheeler, se establecieron las velocidades críticas de sedimentación mediante una hoja de cálculo desarrollada en Microsoft Excel 2007 para automatizar los cálculos del dimensionamiento de las líneas. Con dicha herramienta se verificaron las líneas de manejo de suspensiones de la unidad 79, obteniéndose un adecuado dimensionamiento de las líneas de residuo de hidroconversión y fondo de vacío desde la bomba G-7921A/B. Por otra parte, las líneas restantes no cumplieron con la relación entre la velocidad de transporte y la velocidad crítica de sedimentación, la cual debe estar comprendida entre 1,05 y 1,8 para evitar la sedimentación de sólidos en el fondo de las líneas que constituye el principal problema de las líneas que manejan suspensiones. De acuerdo a esto los programas de Weir y Fluor Daniel son los que arrojaron resultados más confiables para el dimensionamiento. Los resultados obtenidos con los programas poseen un porcentaje de desviación promedio del 32,22% aproximadamente, con respecto a los del dimensionamiento real de las líneas de la unidad 79 (*Residuo Work-up*).

ÍNDICE

RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN.....	x
ÍNDICE	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvii
CAPÍTULO I.....	19
EL PROBLEMA	19
1.1. Presentación de la Empresa	20
1.1.1. Divisiones de PDVSA.....	21
1.1.2. Misión y visión de la empresa.....	22
1.2. Planteamiento del Problema	22
1.3. Objetivos.....	24
1.3.1. Objetivo General.....	24
1.3.2. Objetivos Específicos.....	24
CAPÍTULO II	26
MARCO TEÓRICO	26
2.1. Antecedentes	26
2.2. Definición de una Suspensión.....	27
2.3. Características de una Suspensión	28
2.4. Parámetros Característicos de una Suspensión	29
2.4.1. Tamaño de Partícula y Distribución.....	29
2.4.2. Porcentaje en Masa de Partículas más Pequeñas	30
2.4.3. Concentración de Sólidos.....	30

2.4.4. Gravedad Específica de los Sólidos	30
2.4.5. Gravedad Específica de la Suspensión.....	31
2.4.6. Forma de la Partícula	31
2.5. Régimen de Flujo en Suspensiones.....	31
2.5.1. Mezclas Homogéneas (Suspensiones de No-Sedimentación)	31
2.5.2. Mezclas Heterogéneas (Suspensiones de Sedimentación).....	32
2.5.3. Mixtos	34
2.6. Fluidos Newtonianos y No-Newtonianos	34
2.6.1. Líquidos Newtonianos	35
2.6.2. Líquidos No Newtonianos	35
2.7. Desgastes en las Tuberías por la Circulación de Suspensiones	35
2.8. Criterios para el Diseño de Tuberías de Transporte de Suspensiones	36
2.8.1. Límite de Operación de la Planta.....	37
2.8.2. Límites de Velocidad de Erosión	38
2.8.3. Recomendaciones Generales de Diseño	38
2.8.4. Otras Consideraciones de Diseño	39
2.8.5. Diseño Detallado de Tuberías y Accesorios	40
2.9. Velocidad Crítica de Sedimentación.....	48
2.10. Dimensionamiento de Líneas que Manejan Suspensiones.....	49
2.10.1. Ecuaciones de Velocidades.....	51
2.10.2. Pérdidas de Carga por Fricción (hf) en Suspensiones Homogéneas (Partículas Esencialmente más Finas que 50µm).....	56
2.10.3. Pérdidas de Carga por Fricción (hf) en Suspensiones Heterogéneas: Categoría "A".....	56
2.10.4. Pérdidas de Carga por Fricción (hf) en Suspensiones Heterogéneas: Categoría "B".....	58
2.10.5. Pérdidas de Carga por Fricción (hf) en Suspensiones Heterogéneas: Categoría "C"	59

2.10.6. Pérdidas de Carga por Fricción (h_f) en Suspensiones Heterogéneas: Categoría "D"	59
2.10.7. Problemas Típicos para el Ingeniero de Procesos.....	60
CAPÍTULO III.....	62
DESARROLLO DEL TRABAJO	62
3.1. Análisis de los Problemas Asociados al Régimen de Flujo en las Líneas de Transporte de Suspensiones	62
3.2. Ecuaciones Aplicables al Transporte de Fluidos Bifásicos (Líquido-Sólido), que se Ajusten a los Rangos Requeridos por PDVSA	65
3.3. Establecimiento de las Velocidades Críticas de Sedimentación de las Partículas Sólidas	67
3.3.1. Cálculo del Volumen del Sólido y del Líquido.....	68
3.3.2. Cálculo de la Densidad de la Suspensión.....	68
3.3.3. Cálculo de la Concentración de Sólidos en Volumen.....	69
3.3.4. Cálculo de la Densidad Específica del Sólido	69
3.3.5. Cálculo de la densidad específica de la suspensión	70
3.3.6. Velocidad Crítica de Sedimentación de Líneas Según Foster Wheeler....	70
3.3.7. Velocidad Crítica de Sedimentación de Líneas Según Flygt.....	74
3.3.8. Velocidad Crítica de Sedimentación de LÍNEAS SEGÚN Fluor Daniel .	77
3.3.9. Velocidad Crítica de Líneas Según Weir	79
3.4. Verificación del Dimensionamiento de las Líneas de Manejo de Suspensiones de la Unidad 79	82
3.4.1. Cálculo para la Verificación de la Velocidad Crítica de Sedimentación..	82
3.4.2. Muestra de Cálculo para Foster Wheeler	83
3.4.3. Muestra de Cálculo para Flygt	87
3.4.4. Muestra de Cálculo para Fluor Daniel	90
3.4.5. Muestra de Cálculo para Weir	92
3.4.6. Cálculo de la Desviación de los Programas	97

3.5. Estructuración de un Programa para la Verificación de Líneas de Manejo de Suspensiones del Proyecto CP-RPLC.....	98
3.5.1. Estructura del Programa.....	99
CAPÍTULO IV.....	107
DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	107
4.1. Análisis de los Problemas Asociados al Régimen de Flujo en las Líneas de Transporte de Fluidos Bifásicos con Suspensiones	107
4.2. Ecuaciones Aplicables al Transporte de Fluidos Bifásicos (Líquido-Sólido) que se Ajusten a los Rangos Requeridos por PDVSA	109
4.3. Establecimiento de las Velocidades Críticas de Sedimentación de las Partículas Sólidas.....	110
4.4. Verificación del Dimensionamiento de las Líneas de Suspensión en la Unidad 79, Mediante la Aplicación de una Hoja de Cálculo.....	118
4.5. Conclusiones	122
4.6. Recomendaciones.....	124
BIBLIOGRAFÍA	126
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO.....	128

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Líneas que manejan suspensiones en la unidad 79 (PDVSA, 2009).....	63
Tabla 2. Ecuaciones para la determinación de velocidad crítica de sedimentación...	65
Tabla 3. Velocidad crítica de sedimentación (m/s) en función del diámetro de tubería y el diámetro de partícula (d85) a un SG=3. (Flygt Industries, 1999)	76
Tabla 4. Entrada de datos, residuo de hidroconversión 85% de conversión (PDVSA, 2009)	83
Tabla 5. Comparación de diámetros entre los diámetros obtenidos con las metodologías utilizadas y los diámetros entregados por JGC.....	97
Tabla 6. Valores variables introducidas en los programas para una conversión del 85%.	112
Tabla 7. Estimación de la velocidad crítica de sedimentación para la línea de residuo de hidroconversión.....	112
Tabla 8. Estimación de la velocidad crítica de sedimentación para la línea de fondo de vacío.	114
Tabla 9. Estimación de la velocidad crítica de sedimentación para la línea de fondo de vacío desde la bomba G-7921A/B.....	115
Tabla 10. Estimación de la velocidad crítica de sedimentación para la línea de reciclo caliente a la torre de vacío.....	116
Tabla 11. Estimación de la velocidad crítica de sedimentación para la línea de reciclo frío a la torre de vacío	116
Tabla 12. Estimación de la velocidad crítica de sedimentación para la línea de fondo de vacío a la formación de hojuelas.	117
Tabla 13. Estimación de la velocidad crítica de sedimentación para la línea de fondo de vacío a la formación de hojuelas (continuación).....	118
Tabla 14. Verificación de la línea de residuo de hidroconversión.....	119

Tabla 15. Verificación de la línea de fondo de vacío.....	119
Tabla 16. Verificación de la línea de fondo de vacío desde G-7921A/B.....	119
Tabla 17. Verificación de la línea de recicló caliente a la torre de vacío.....	120
Tabla 18. Verificación de la línea de recicló frío a la torre de vacío	120
Tabla 19. Verificación de la línea de fondo de vacío a la formación de hojuelas....	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación de una curva de tamizado. (Flygt Industries, 1999).....	29
Figura 2. Representación de la concentración en volumen y peso de los sólidos.....	30
Figura 3. Régimen de flujo homogéneo. (Flygt Industries, 1999).....	32
Figura 4. Régimen pseudo-homogéneo. (Flygt Industries, 1999).....	33
Figura 5. Régimen heterogéneo. (Flygt Industries, 1999)	33
Figura 6. Régimen mixto. (Flygt Industries, 1999)	34
Figura 7. Tres principales modos de erosión por desgaste. (Warman International LTD, 2000).....	36
Figura 8. Ejemplificación de deposiciones del sólido en la tubería.....	41
Figura 9. Conexiones de tuberías para evitar depósitos. (Foster Wheeler, 1982).....	41
Figura 10. Ejemplificación de ramificaciones. (Foster Wheeler, 1982)	44
Figura 11. Tipo de desagüe en bombas. (Foster Wheeler, 1982).....	46
Figura 12. Velocidad de flujo con respecto a la caída de presión (Warman International LTD, 2000)	49
Figura 13. Curvas típicas de pérdidas por fricción para suspensiones heterogéneas categoría “A”. (Warman International LTD, 2002)	57
Figura 14. Representación de las líneas estudiadas.	63
Figura 15. Menú y página principal.	100
Figura 16. Propiedades del fluido	101
Figura 17. Tutorial del programa	102
Figura 18. Programa según Flygt.....	103
Figura 19. Programa según Fluor Daniel	104
Fig.ura 20. Programa según Weir	105
Figura 21. Programa según Foster Wheeler.....	106

Figura 22. Representación de las líneas estudiadas señalando la línea problema de la
unidad 79..... 108

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

La ciencia de la hidráulica de las suspensiones comenzó a florecer en la década de los años 50 con las pruebas simples de bombeo de arena y carbón a concentraciones moderadas. Esta, ha evolucionado gradualmente para abarcar los requerimientos de bombeo en los procesos industriales, tales como mezclas de carbón y aceites, nuevos combustibles y numerosas mezclas de agua y minerales.

Debido a la diversidad de materiales a bombear, la amplia gama de tamaños de partículas y las propiedades físicas y químicas de los materiales, la ingeniería de sistemas de suspensiones requiere varios modelos empíricos y matemáticos. La ingeniería de los sistemas de suspensiones y el diseño de tubería para el transporte de las mismas es bastante complicada, ya que se debe tomar en cuenta a la velocidad crítica de sedimentación para el dimensionamiento de las líneas. Esta velocidad es de gran interés en el diseño de sistemas de transporte hidráulico por tuberías, ya que si la velocidad del flujo de una suspensión transportada cae por debajo de ese valor, el taponamiento de la tubería y la falla del sistema es inminente.

Diversos autores han realizado una revisión bibliográfica sobre la materia, proponiendo nuevas ecuaciones para calcular los valores de la velocidad crítica con mejor aproximación y mayor rango de aplicación que los existentes; pero el empirismo de las mismas conlleva a resultados que en ocasiones no son confiables. Esto aunado a la falta de datos que se tenga sobre una línea de manejo de suspensiones, imposibilita una aproximación segura de la velocidad de sedimentación que se deba utilizar para evitar posibles riesgos en las líneas.

Autores como Durand, Newitt, Zandi y Oroskar (1980) presentaron ecuaciones empíricas basadas en datos experimentales; y este último propuso una ecuación teórica basada en el balance de energía turbulenta. Davis (1980) y Sommerville (1991) dedujeron una ecuación teórica con base en el análisis de equilibrio de fuerzas turbulentas. Kökpınar (2001) presentó una ecuación empírica con base en sus datos experimentales, que estudia el efecto de la densidad de las partículas sólidas sobre la velocidad crítica de sedimentación.

1.1. Presentación de la Empresa

Petróleos de Venezuela S.A (PDVSA) es la casa matriz de la corporación, propiedad de la República Bolivariana de Venezuela, regida por la ley orgánica que reserva al Estado la industria y el comercio de los hidrocarburos. Se encarga del desarrollo de la industria petrolera, petroquímica y carbonífera; tiene como actividad planificar, coordinar, supervisar y controlar las actividades operativas de sus divisiones, tanto en Venezuela, como en el exterior, ocupando una destacada posición entre los refinadores mundiales por su red de manufactura y mercado. Además realiza actividades en las áreas de investigación y desarrollo tecnológico, educación y adiestramiento en sectores vinculados con la industria energética. (Historia de PDVSA, 2004)

Con el reto de mantenerse como una empresa competitiva rentable frente a los nuevos tiempos, PDVSA ha puesto en marcha la transformación de su estructura corporativa, con el propósito fundamental de redefinir el papel de la casa matriz y consolidar la estructura operativa. En este sentido a finales de 1997, la corporación energética venezolana creó con la fusión de sus filiales Corpoven, Maraven y Lagoven, las empresas PDVSA Manufactura y Mercadeo, y PDVSA Servicios. Cada una de estas divisiones está integrada a su vez por diversas empresas y unidades de negocio, ubicadas tanto en Venezuela como en el exterior.

1.1.1. Divisiones de PDVSA

•PDVSA Exploración, Producción y Mejoramiento. Es responsable por el desarrollo de petróleo, gas, carbón. Esta división está compuesta por las siguientes unidades de negocio: PDVSA Exploración, PDVSA Producción Faja, Bitor-Carbozulia y CVP.

•PDVSA Refinación, Suministro y Mercadeo. Está a cargo de las actividades de refinación de crudos, así como la manufactura de productos, comercialización y suministro para el mercado nacional e internacional. Además, se encarga de la comercialización del gas natural y cumple funciones de transporte marítimo. Esta organización está constituida por: Refinación y Comercio, Deltaven, PDV Marina y PDVSA Gas.

•PDVSA Servicios. Esta división es responsable del suministro de servicios integrados, especializados y competitivos, a toda la corporación. Su área de gestión incluye una amplia gama de especialidades, entre las cuales se destaca: suministro de bienes y materiales, servicios técnicos, consultorías y asesorías profesionales, informática e ingeniería, entre otras. Esta organización está compuesta por Bariven,

•PDVSA Ingeniería y Proyectos, PDVSA Administración y Servicios, Consultoría Jurídica, Recursos Humanos, Finanzas y Asuntos Públicos, continuando en el desarrollo de todas sus actividades, con especial énfasis en las áreas de explotación y producción de yacimientos de crudos livianos y pesados que son vitales actualmente para la aplicación de nuevos mercados internacionales. (Historia de PDVSA, 2004)

1.1.2. Misión y visión de la empresa

Visión. La visión de PDVSA es la de ser reconocida internacionalmente como la corporación energética de referencia mundial por excelencia, a través del aprovechamiento óptimo de sus recursos, la eficiencia operacional y la introducción oportuna de nueva tecnología; con personal de primera, preparado y motivado, preservando su integridad y la de los activos, en total armonía con el medio ambiente y el entorno. Además la de ser la organización líder en la generación de los lineamientos técnicos para el establecimiento de las estrategias de exploración y producción, a mediano y largo plazo.

Misión. PDVSA es una organización energética destinada a la exploración, producción y mejoramiento de hidrocarburos, y tiene la misión de satisfacer las necesidades de energía de la sociedad, promoviendo el crecimiento socioeconómico. (Historia de PDVSA, 2004)

1.2. Planteamiento del Problema

Actualmente, se lleva a cabo la explotación de crudos pesados de la faja petrolífera del Orinoco con la tecnología de “rechazo al carbón-(coquización retardada)”, tecnología utilizada por los mejoradores de crudo tradicionales establecidos en el complejo industrial de Jose. La tecnología de rechazo al carbón pierde en forma de coque alrededor del 20% de los hidrocarburos suministrados, originándose grandes cantidades de coque verde (todavía útil para su fraccionamiento) de menor valor comercial que el crudo original. El coque así generado produce además un gran impacto ambiental.

Como respuesta a esta situación Petróleos de Venezuela Sociedad Anónima (PDVSA) pondrá en marcha el proyecto Conversión Profunda en la refinería Puerto

La Cruz (CP-RPLC), localizada en la vía que une los municipios Juan Antonio Sotillo y Guanta del estado Anzoátegui, donde se procesará el crudo proveniente de la faja petrolífera del Orinoco, que contiene impurezas de metales de níquel y vanadio, entre otros, que son de difícil procesamiento.

Se utilizará una tecnología propia desarrollada por el Instituto de Tecnología Venezolana para el Petróleo (INTEVEP) que consumirá hidrógeno por vía catalítica en los reactores de hidroconversión profunda, originando corrientes con altas relaciones H/C; y por lo tanto, una mayor cantidad de productos livianos. Con esta novedosa tecnología se producirá una menor cantidad de coque, alrededor de 5% de los hidrocarburos alimentados, contra un 20% del producido en los mejoradores que usan la tecnología de rechazo al carbón.

El proyecto CP-RPLC mejorará la competitividad de la refinería Puerto La Cruz, al introducir la capacidad de procesar crudo Merey de 16°API.

Uno de los desafíos de este proyecto es el diseño y dimensionamiento adecuado de las líneas de procesos que manejarán fluidos en fase líquida-sólida-gas, siendo necesario determinar el rango de las velocidades de transporte, tal que no sea tan baja como para causar la sedimentación de los sólidos y ni tan alta como para causar riesgos de erosión o caídas de presión por encima de las especificaciones de PDVSA. Lograr los niveles de velocidad adecuados implicaría una mayor eficiencia del proceso, así como, un ahorro financiero, energético, y en tiempo de mantenimiento en las líneas y sistemas operativos que manejen los fluidos bifásicos en el complejo industrial CP-RPLC.

Para ello se planteó la necesidad de determinar la velocidad adecuada de operatividad, mediante la búsqueda y comparación de ecuaciones desarrolladas en el área de transporte de suspensiones (*slurries*) y fueron programadas en una hoja de

cálculo para de este modo verificar las múltiples líneas por donde circularán dichos fluidos.

La importancia de este trabajo es que conllevará al desarrollo de una herramienta que permita verificar el dimensionamiento de las líneas anteriormente nombradas, en especial a la alimentación al proceso HDHPLUS® (proceso de hidrogenación a altas presiones y altas temperaturas) y evitar a su vez riesgos operacionales del proyecto CP-RPLC. Por otra parte, este trabajo tiene implícita la rápida disponibilidad de ecuaciones y correlaciones para el transporte de suspensiones bifásicas que enriquecerán la plataforma tecnológica de PDVSA.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar las líneas de manejo de suspensiones en la unidad 79 del proyecto Conversión Profunda de la refinería Puerto La Cruz

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Analizar los problemas asociados al régimen de flujo en las líneas de transporte de fluidos bifásicos con suspensiones.

2. Encontrar ecuaciones aplicables al transporte de fluidos bifásicos (líquido-sólido), que se ajusten a los rangos requeridos por PDVSA.

3. Establecer las velocidades críticas de sedimentación de las partículas sólidas.

4. Verificar el dimensionamiento de líneas que manejan suspensiones en la unidad 79 (*Residue Workup*).

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

No se encontraron antecedentes relacionados directamente sobre el transporte de suspensiones (líquido-sólido) por tuberías; a pesar de ello, se seleccionaron algunas tesis de grado y otras publicaciones debido a que algunos parámetros de diseño y ecuaciones son semejantes a las utilizadas en el proyecto CP-RPLC.

Vásquez (2009) evaluó el comportamiento del flujo bifásico aire-agua en una tubería horizontal mediante herramientas numéricas de dinámica de fluido computacional (DFC), con las cuales se evidenció la influencia del aumento de la velocidad superficial del agua sobre la caída de presión total del sistema; por otra parte, estableció la aplicabilidad de la DFC en la resolución de problemas con flujo bifásico en tuberías horizontales.

García (2008) realizó un diseño preliminar de un sistema hidráulico para la recuperación de los productos remanentes en el terminal marino de Jose, obteniendo que la cantidad de tubería necesaria para hacer la conexión (120 m y 6’’), utilizándose un material de acero al carbono. La implantación de este proyecto significó una disminución del impacto ambiental ocasionado por la quema de productos como propano y gasolina/pentano.

Vargues y Zacarías (2008) realizaron el diseño preliminar del gasoducto Barbacoa-Margarita, para lo cual desarrollaron los cálculos correspondientes para el dimensionamiento de la tubería, utilizando la ecuación de Panhandle para estimar el

diámetro de la tubería, obteniéndose una presión de salida de 1.080 psia y una presión de entrada de 200 psia, para una tubería de 20". También calcularon las caídas de presión con la ecuación de Barlow y se definieron los posibles impactos ambientales que la implantación de este proyecto podría ocasionar.

Por otra, parte Fluor Daniel (1996) se encargó del diseño de manuales para el dimensionamiento hidráulico para líneas de "slurry", basándose en los métodos propuestos por INTEVEP para su tecnología HDHTM (marca registrada por INTEVEP en Venezuela, previa a HDHPLUS).

Los alemanes Franz Fischer y Hans Tropsch desarrollaron en 1920, una tecnología para la producción de hidrocarburos líquidos (gasolina, querosén, gasoil y lubricantes) a partir de gas de síntesis (CO y H₂), utilizando reactores "slurry", donde el catalizador se encontraba en suspensión con un líquido (a menudo, ceras producidas por la propia reacción), en el cual se burbujea el gas de síntesis. Algunas de las plantas que utilizan hoy día la tecnología Fischer-Tropsch son: Sasolburg (Sudáfrica), "Oryx" (Qatar), Erdos (Mongolia Interior, China), entre otras. (Muro Bot, 2010)

2.2. Definición de una Suspensión

Una suspensión sólido-líquido puede ser una mezcla de prácticamente cualquier líquido combinado con algunas partículas sólidas. La combinación del tipo, tamaño, forma y cantidad de las partículas, junto con naturaleza del líquido transportado, determinan las características exactas y las propiedades de flujo de la suspensión. (Warman International LTD, 2000)

Una suspensión tipo "slurry" es esencialmente una mezcla de un fluido portador y las partículas sólidas en suspensión. El fluido más utilizado es el agua, pero con los

años, se han hecho intentos de utilizar los aceites con carbón molido, e incluso el aire como transporte neumático.

El flujo de lodo en una tubería es muy diferente al de la corriente de un líquido de una sola fase. En un líquido de una sola fase de baja viscosidad absoluta (o dinámica) el flujo a bajas velocidades es flujo laminar y se convierte en turbulento a altas velocidades. Sin embargo, en una mezcla de dos fases, como las suspensiones, se debe superar una velocidad crítica de sedimentación o una velocidad de transición viscosa crítica. Si la velocidad de la mezcla no es suficientemente alta, las partículas no se mantienen en suspensión. Por otra parte, en el caso de las mezclas de alta viscosidad, si la velocidad de deformación en la tubería es excesivamente baja, la mezcla será demasiado viscosa y tenderá a resistirse al flujo. (Abulnaga, 2002)

2.3. Características de una Suspensión

Las suspensiones se pueden dividir en dos grupos generales: las de no-sedimentación y las de sedimentación de lodos. La no-sedimentación de lodos implica partículas muy finas que pueden formar mezclas homogéneas, exhibiendo un aumento de la viscosidad aparente. Estos lodos por lo general tienen un bajo uso pero es necesario un examen muy cuidadoso al seleccionar las bombas y las unidades correctas, porque a menudo no se comportan de la manera como se comporta un líquido normal. Cuando los sólidos finos están presentes en suficiente cantidad para causar un cambio en el comportamiento fuera de un líquido normal, se les conoce como no-newtoniano. (Warman International LTD, 2000)

Las suspensiones de sedimentación están formadas por partículas más gruesas y tienden a formar una mezcla inestable, y por lo tanto se debe prestar especial atención a los cálculos de flujo. Estas partículas más gruesas tienden a tener mayor importancia en los criterios de diseño y constituyen la mayoría de usos de la mezcla.

A este tipo de mezcla también se le conoce como heterogéneo. (Warman International LTD, 2000)

2.4. Parámetros Característicos de una Suspensión

2.4.1. Tamaño de Partícula y Distribución

Es una medida del porcentaje de partículas en la suspensión con un determinado tamaño o más pequeños.

El valor se determina por tamizado de sólidos con diferentes mallas y pesando cada fracción. En una curva de tamizado se pueden leer el porcentaje de partículas a diferentes tamaños (figura 2.1). Por ejemplo, una nomenclatura puede ser $d_{85} = 3 \text{ mm}$ lo cual significa que el 85% de las partículas tienen un diámetro de 3 mm o menos. (Flygt Industries, 1999)

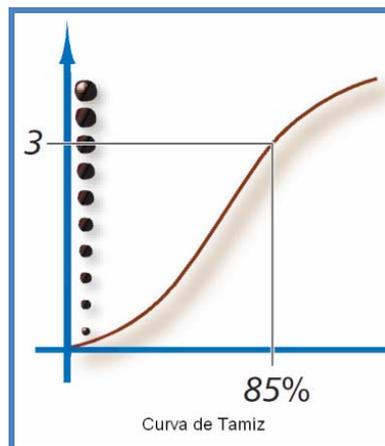


Figura 1. Representación de una curva de tamizado. (Flygt Industries, 1999)

2.4.2. Porcentaje en Masa de Partículas más Pequeñas

Las partículas más pequeñas que $75\mu\text{m}$ pueden facilitar en cierto grado el transporte de partículas largas. Sin embargo, si el porcentaje de partículas menores de $75\mu\text{m}$ excede el 50%, la característica de la suspensión cambia hacia una de no-sedimentación. (Flygt Industries, 1999)

2.4.3. Concentración de Sólidos

La concentración de partículas en la suspensión puede ser medida como un porcentaje de volumen, $\%C_v$, y un porcentaje de peso, $\%C_m$; tal como se ilustra en la figura 2.2. (Flygt Industries, 1999)

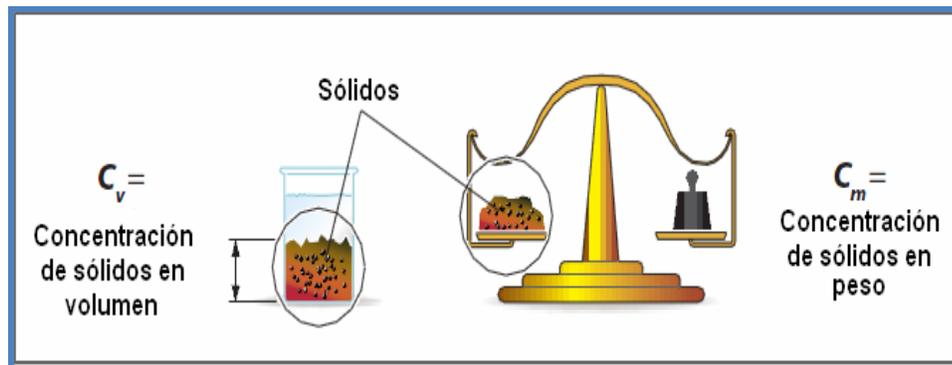


Figura 2. Representación de la concentración en volumen y peso de los sólidos.

2.4.4. Gravedad Específica de los Sólidos

La densidad de los sólidos se expresa como su gravedad específica. Este valor, SG_s , se determina dividiendo la densidad del sólido por la densidad del agua. La densidad del agua es de 1.000 kg/m^3 a 20°C . La gravedad específica del agua es de 1,0 a 20°C y su valor varía un poco con la temperatura.

2.4.5. Gravedad Específica de la Suspensión

El peso específico de la suspensión puede ser determinado mediante un nomograma o calculado. Se deben conocer dos de los tres valores característicos de la suspensión: SG_m , C_v , y C_m . (Chhabra, 1999)

2.4.6. Forma de la Partícula

La forma de cada partícula es muy significativa para el comportamiento de la suspensión cuando es bombeada y por el desgaste que puedan ocasionar en el sistema de tuberías. Generalmente si no se conoce a ciencia cierta la forma de la partícula, se supone que ésta es una esfera perfecta. (Flygt Industries, 1999)

2.5. Régimen de Flujo en Suspensiones

Antes de diseñar tuberías de lodos, es fundamental conocer que los sólidos pueden agruparse de diferentes maneras, con patrones característicos, al fluir por una tubería. Ello determina que se tengan mezclas homogéneas, heterogéneas y mixtas.

2.5.1. Mezclas Homogéneas (Suspensiones de No-Sedimentación)

Se caracterizan por una alta concentración de sólidos y partículas muy finas. Las partículas quedan uniformemente distribuidas en el líquido y no se sedimentan sino que permanecen en suspensión durante mucho tiempo. Por lo tanto, tales mezclas se conocen como suspensiones de no-sedimentación. Estas mezclas suelen tener las propiedades de fluidos no-newtonianos y presentan tamaños de partícula menores a $100 \mu\text{m}$ (figura 2.3). (Foster Wheeler, 1982)



Figura 3. Régimen de flujo homogéneo. (Flygt Industries, 1999)

2.5.2. Mezclas Heterogéneas (Suspensiones de Sedimentación)

Son aquellas en que los sólidos y líquidos forman dos fases distintas. Por lo general, son de relativa baja concentración de sólidos y de tamaño de partículas grande. Estas mezclas se conocen como “suspensiones de sedimentación”, puesto que los sólidos tienden a sedimentarse a lo largo de las líneas. (Foster Wheeler, 1982) Este tipo de suspensión sedimenta durante un tiempo relevante del proceso, pero se puede mantener en suspensión por la turbulencia. El tamaño de partículas supera los 100 μm . Las suspensiones de sedimentación pueden ser de mezcla pseudo-homogénea o heterogénea, y puede estar completa o parcialmente estratificada. (Flygt Industries, 1999)

2.5.2.1. Mezcla Pseudo-Homogénea

Es una mezcla en la cual todas las partículas están en suspensión, pero cuando la concentración es mayor, estas partículas tienden a irse hacia el fondo (figura 2.4). (Flygt Industries, 1999)



Figura 4. Régimen pseudo-homogéneo. (Flygt Industries, 1999)

2.5.2.2. Mezcla Heterogénea

Es una mezcla de sólidos y líquidos en donde los sólidos no están uniformemente distribuidos y tienden a estar más concentrados en el fondo de la tubería o en los tanques que lo contienen (figura 2.5). (Flygt Industries, 1999)



Figura 5. Régimen heterogéneo. (Flygt Industries, 1999)

2.5.3. Mixtos

Muchas suspensiones presentan características mixtas o compuestas. La fracción más fina de los sólidos forma una fase homogénea, mientras que el material más grueso tiende a sedimentarse (figura 2.6). Un ejemplo típico es una mezcla formada por una suspensión de sólidos de carbón finamente dividido, como la utilizada para producir un líquido con un alto poder calorífico. Este es uno de los regímenes con mayor problema para determinar la velocidad a la cual se debe transportar la suspensión para evitar la sedimentación de la línea. (Foster Wheeler, 1982)



Figura 6. Régimen mixto. (Flygt Industries, 1999)

2.6. Fluidos Newtonianos y No-Newtonianos

Los líquidos se deforman continuamente mientras se aplica una fuerza a ellos. Siempre que un líquido fluye, se genera una fricción interna derivada de la cohesión de las moléculas. Esta fricción interna es la característica de un líquido llamada viscosidad. La viscosidad de los líquidos disminuye rápidamente al aumentar la temperatura. Dependiendo de la variación de la viscosidad con la tasa de corte, los fluidos se clasifican en newtonianos o no-newtonianos.

2.6.1. Líquidos Newtonianos

Los líquidos newtonianos dan una tensión de corte que es lineal y proporcional al gradiente de velocidad, o la tasa de corte. El agua y la mayoría de los líquidos son newtonianos.

2.6.2. Líquidos No Newtonianos

Algunos líquidos, como los lodos basados en partículas finas, no obedecen a la simple relación entre el estrés y la tasa de corte. Se conocen como líquidos no newtonianos. Algunos líquidos no newtonianos tienen una propiedad única de no fluir hasta que no se aplique un mínimo esfuerzo cortante. Este esfuerzo de corte mínimo se conoce como el límite de elasticidad. (Flygt Industries, 1999)

2.7. Desgastes en las Tuberías por la Circulación de Suspensiones

En aplicaciones de bombeo de suspensiones, el modo dominante de desgaste es la erosión. La erosión es una forma de desgaste que implica la pérdida de material de la superficie de las paredes internas de la tubería, por la acción de partículas arrastradas por el fluido. La erosión implica una transferencia de energía cinética de cada partícula.

La transferencia de energía cinética de la partícula a la superficie resulta en una alta tensión de contacto. Mientras que la presión de contacto global en cada sitio de impacto es pequeña, la presión de contacto específica (en un punto de la tubería) es alta, debido a la forma irregular de las partículas.

Hay tres tipos básicos de la erosión: deslizante, impacto al azar e impacto direccional, tal como se muestra en la figura 2.7. (Warman International LTD, 2000)

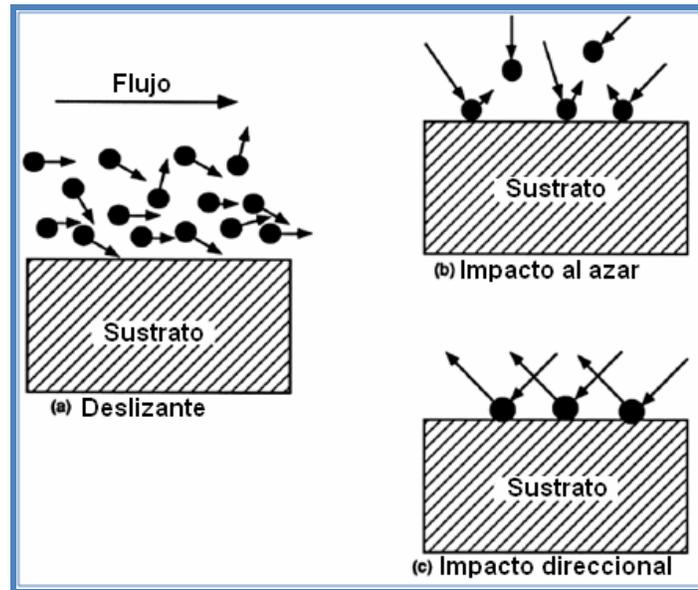


Figura 7. Tres principales modos de erosión por desgaste. (Warman International LTD, 2000)

2.8. Criterios para el Diseño de Tuberías de Transporte de Suspensiones

Un factor importante a considerar en el diseño de líneas de suspensión de dos fases (sólido/líquido) es la necesidad de mantener las partículas en suspensión todo el tiempo. Si la velocidad cae por debajo de cierto mínimo, conocido como la velocidad crítica, los sólidos tienden a sedimentarse. En mezclas heterogéneas y en régimen de flujos intermedios ésta es la consideración más importante.

Cuando las partículas sólidas se hacen más grandes, la diferencia entre las gravedades específicas del sólido y el líquido aumenta, y las partículas se sedimentan fácilmente. Como consecuencia, la velocidad necesaria para evitar la sedimentación es mayor. Los métodos disponibles para calcular esta velocidad requerida no son precisos; varios autores demandan nuevos sistemas de análisis de laboratorio para

hacer las estimaciones de la velocidad crítica y verificar la exactitud de las correlaciones teóricas. Debido a esta consideración es posible obtener errores en las corrientes de suspensión en la unidad HDHPLUS y en muchos escenarios de operación, a la hora de calcular las velocidades críticas de sedimentación, ya que la mayoría de las correlaciones que existen están basadas en el uso de agua como el medio líquido e incluso se han simplificado las correlaciones utilizando la densidad y la viscosidad de la suspensión. (Fluor Daniel, 1996)

2.8.1. Límite de Operación de la Planta

El “Límite de operación de la planta” define cuánto flujo de suspensión por debajo de la operación normal debe continuar trabajando un sistema. Para el transporte de suspensiones se considera un 70% del flujo normal. El sistema debe ser chequeado para asegurar que la velocidad de transporte está por encima del mínimo requerido, seleccionando adecuadamente el tamaño de la línea o variando la velocidad de flujo. (Fluor Daniel, 1996)

El Límite de operación de la planta en los sistemas de suspensión presenta al diseñador problemas especiales. El principal problema surge de la necesidad de mantener velocidades de flujo para evitar la segregación de los sólidos y líquidos. Existen varios métodos para lidiar con esta problemática y algunas recomendaciones son las siguientes:

A. El Límite de operación de la planta podrá lograrse mediante la reducción del contenido de los sólidos de la suspensión, pero manteniendo el mismo flujo de líquido.

B. Recirculando la suspensión en todo el sistema, con el grado de purga requerido. Cuando la capacidad total es requerida es necesario cerrar la tubería de

retorno. Este tipo de sistema puede tener la desventaja de causar la rotura del cristal si la suspensión se recircula continuamente a través de la bomba y tuberías asociadas. (Foster Wheeler, 1982)

2.8.2. Límites de Velocidad de Erosión

Se han hecho estudios completos sobre la erosión y se han establecido límites de velocidad para la mayoría de las plantas. Estos límites de velocidad pueden ser considerados en los cálculos hidráulicos y para establecer el dimensionamiento de las líneas con manejo de suspensiones. (Fluor Daniel, 1996)

2.8.3. Recomendaciones Generales de Diseño

Los tres objetivos básicos del diseño correcto de los sistemas de manejo de suspensiones son los siguientes:

1. Asegurarse que los sólidos no sedimentan durante el funcionamiento normal; por ejemplo, mantener la velocidad adecuada previene las fuentes de bloqueo en las tuberías.

2. Asegurarse que las medidas adoptadas para evitar el bloqueo (por ejemplo, altas velocidades) no creen otros problemas, tales como:

- a) Ruptura de los cristales en la suspensión, lo cual se traduce en la posibilidad de que los procesos de separación aguas abajo sean más difíciles. Como por ejemplo: centrifugación, filtración, etc. Y también podría dar lugar a la probabilidad de obtenerse un producto de menor calidad.

- b) La erosión y corrosión en tuberías y accesorios.

3. Maximizar los alivios con los que los bloqueos pueden ser removidos; esto ocurre con líneas removibles, puntos de descarga, etc. (Foster Wheeler, 1982)

2.8.4. Otras Consideraciones de Diseño

A fin de garantizar que las consideraciones críticas más importantes para un determinado sistema de suspensiones se incorporen en las primeras etapas de un diseño de una planta, se recomienda el siguiente enfoque:

1. Identificar todos los sistemas de suspensiones en una copia del diagrama de flujo del proceso (PFD).

2. Determinar los tipos de las suspensiones que han de ser manipuladas, por ejemplo, ¿los sólidos flotan o se hunden?, ¿los sólidos compactan, forman un conjunto duro o forman un gel?

3. Usando los PFD marcados, desarrollar el diseño de sistemas de suspensiones con la tubería en los que se ejecutan los criterios más importantes. Para ayudar en esta actividad se recomienda realizar un diagrama de bloque modelo para el manejo de suspensiones.

4. Las líneas de suspensiones deben ser lo más cortas y más rectas posible.

En una fase posterior del proyecto, las actividades que se requieren son las siguientes:

5. Desarrollar una guía de líneas de suspensiones específicas para el proyecto.

6. Identificar todas las líneas de suspensiones en los diagramas de tuberías e instrumentación y en el listado de líneas. Se recomienda identificar el tipo de suspensión en la numeración de líneas, es decir, uso de subíndices (S_1), (S_2), etc.

7. Mostrar todos los requisitos mínimos de distancia, sin olvidar la ubicación de válvulas de control, etc.

8. Mostrar también los requisitos para la colocación de barras de salida, puntos de lavado, bridas de ruptura, etc, si son manipuladas diferentes tipos de suspensiones.

2.8.5. Diseño Detallado de Tuberías y Accesorios

Una vez que los criterios de velocidad se han decidido y la tubería de manejo de suspensiones ha sido dimensionada, el diseño detallado del sistema de tuberías debe contemplar:

2.8.5.1. Enrutamiento

El enrutamiento de tuberías con suspensiones es de primordial importancia y debe regir el diseño (siguiendo las bases del enfoque de diseño).

El uso de líneas horizontales o inclinadas deberá ser considerado línea por línea. En ciertas circunstancias una línea inclinada puede ser de ayuda; por ejemplo en un proceso de lavado con agua después de que la suspensión se transporta; ello permite fácilmente el escurrimiento del agua y evita el depósito de los sólidos. Sin embargo, una línea inclinada que conduce a una válvula puede resultar en un tapón sólido en la válvula, si ésta debe ser cerrada. En tales circunstancias, una línea horizontal permitiría a los sólidos instalarse en la parte inferior de la tubería y no

afectaría a la válvula. La reanudación del flujo podría remover a los sólidos fijos depositados anteriormente (figura 2.8).

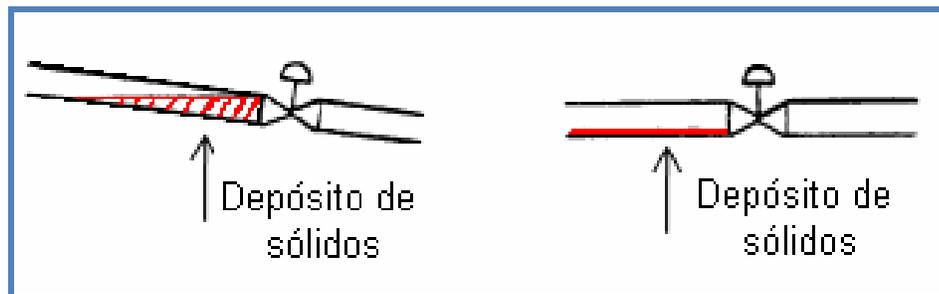


Figura 8. Ejemplificación de deposiciones del sólido en la tubería.

Las concavidades son inaceptables, tal como se indica en la figura 2.9. Esto puede causar taponamiento en una condición de ausencia de flujo.

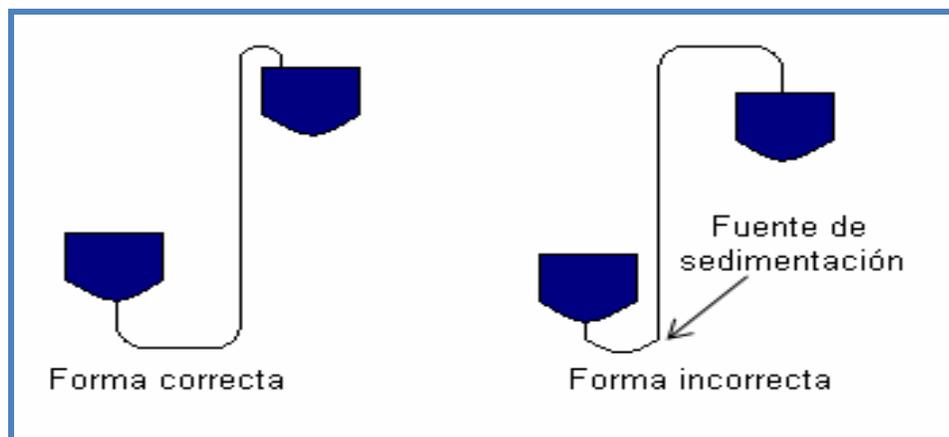


Figura 9. Conexiones de tuberías para evitar depósitos. (Foster Wheeler, 1982)

2.8.5.2. Curvas

Los codos de radio largo se utilizan para reducir los cambios en el patrón de flujo cuando se cambia la dirección del flujo. Esto a su vez, reduce al mínimo las posibilidades de puntos muertos en el flujo de la suspensión.

Las curvas en el diseño de tuberías para el manejo de suspensiones deben mantenerse al mínimo y no deben ser normalmente inferiores a 5D (cinco veces el diámetro). Cualquier desviación de las 5D del radio mínimo, debe ser aprobada por el “jefe de tuberías”.

Con el fin de minimizar los cambios bruscos de dirección, dos curvas de 45° serían preferibles a una curva de 90°. También, es mejor instalar un tubo recto adicional si con ello el número de curvas en una línea se puede reducir.

2.8.5.3. Tensión

Lo ideal sería que la tubería de suspensiones pueda ser diseñada para proporcionar la suficiente flexibilidad dentro de la configuración propuesta. El requisito para tramos rectos cortos a menudo impone un requisito de fuelle; sin embargo, el uso de fuelles de expansión debe reducirse al mínimo ya que los sólidos se pueden acumular en las circunvoluciones de los fuelles y evitar la compresión del fuelle. Los fuelles requeridos deben ser del tipo de presión externa con conexiones de lavado, las cuales pueden ser mangueras flexibles.

2.8.5.4. Puntos Muertos

Los puntos muertos deben ser evitados en las líneas que manejen suspensiones para evitar la sedimentación. Estos generalmente se pueden eliminar mediante el uso de un modelo de bloques en las etapas preliminares del diseño.

2.8.5.5. Válvulas

Las válvulas de bola o válvulas macho son generalmente las mejores en el servicio de suspensiones. Estas dan una resistencia mínima al flujo, y la válvula de bola en particular presenta una mínima restricción cuando está completamente abierta. La válvula de diafragma, puede considerarse también. Se debe considerar el uso de válvulas de 3 vías para las conexiones de las bombas.

Las válvulas en las líneas de suspensiones se instalan en el plano horizontal para evitar la acumulación de depósitos de lodos. Debe prestarse especial atención a los equipos en espera. Un ejemplo típico de esto sería un par de bombas de alimentación en gestión común. Las válvulas de cierre de las bomba deberán estar situadas lo más cerca posible del cabezal común, incluso si esto significa que las válvulas se encuentran encima del nivel normal de funcionamiento. Ruedas de cadena o plataformas locales deben ser contempladas para facilitar la operación de la válvula. (Foster Wheeler, 1982)

La ubicación de la válvula debe ser revisada para minimizar el riesgo o el alcance de la acumulación de sólidos cuando la válvula está cerrada.

Cuando se considera el acceso a las válvulas o equipos en línea el diseñador debe adoptar una filosofía diferente a la que habitualmente utilice. Normalmente, el acceso a una válvula se logra mediante el enrutamiento de una línea a una plataforma

o estructura, mientras que en el caso de las líneas de suspensión es primordial mantener la dirección correcta de la línea y válvulas para evitar puntos muertos. Las adiciones de las plataformas locales, ruedas de cadena o husillos de extensión, son métodos aceptables de lograr el acceso de la válvula. El enfoque debe ser siempre localizar todas las válvulas correctamente desde un punto de vista de flujo y luego examinar los medios de acceso a ellos.

Se debe reducir al mínimo el número de válvulas y no deben utilizarse derivaciones (*by-passes*).

2.8.5.6. Ramificaciones

Los pequeños ramales hacia y desde las líneas principales de suspensiones son mejor situarlas en la parte superior de las líneas horizontales o en la parte alta en el lado de las líneas verticales (figura 2.10). Esto contribuye a garantizar un despeje de sólidos del ramal de vuelta a la línea principal en el caso de interrupción de flujo. Una línea principal grande es generalmente más fácil de limpiar que un ramal pequeño.

Considerar también la posibilidad de conexiones inclinadas a las líneas verticales y minimizar el número de ramificaciones. (Foster Wheeler, 1982)

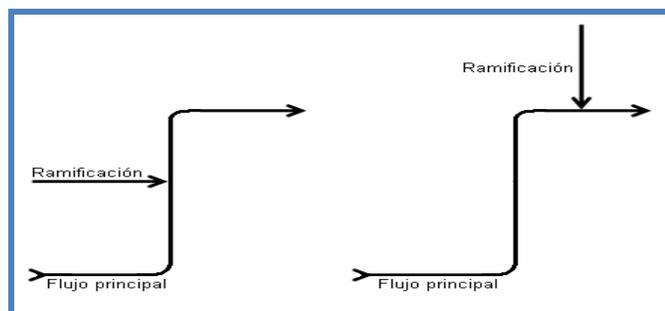


Figura 10. Ejemplificación de ramificaciones. (Foster Wheeler, 1982)

2.8.5.7. Drenajes/Desagües

Los drenajes pueden estar situados en la línea central de la tubería o en 45° sobre la horizontal. Este último método permite fácil acceso para varillas si la línea está cerca o al nivel del suelo. La única excepción a esto es cuando se especifican válvulas de descarga inferior. Estas pueden ser montadas en la parte inferior de la línea ya que en operación obligaría a los sólidos a pasar a través de los drenajes; sin embargo, el diseñador debe considerar el permitir el uso de válvulas de descarga inferior adicionales. Las válvulas de cierre y las válvulas de control son considerablemente más utilizadas que las válvulas convencionales.

Se recomienda el uso de válvula de bola de apertura total para los puntos bajos de drenaje sin válvulas en la tubería, para permitir el paso de las varillas, o también la utilización de válvulas de descarga en el fondo. Si las válvulas de bola son usadas, debe asegurarse de usar la longitud mínima de la boquilla entre la línea y la válvula. (Foster Wheeler, 1982)

El disolvente de lavado y las conexiones de purga pueden ser a menudo colocados en la parte superior de las tuberías de las líneas de suspensiones, localizándolas lo más cerca posible a los medios a lavar de esa sección de la línea y en el extremo opuesto de la línea para la conexión de desagüe. El diseñador debe tener el objetivo de lavar la máxima longitud de la línea de suspensión entre punto de lavado y de drenaje.

Las líneas de manejo de suspensiones no deben estar alejadas de la corriente que lleva a los puntos de drenaje. Además, no es recomendable que un drenaje maneje dos o más líneas de suspensiones que deban ser lavadas luego de la operación. Siempre se debe tener especial cuidado con esta consideración cuando se tiene un

cabezal de tubería común y se debe asegurar que la línea de drenaje pueda ser lavada adecuadamente.

Las bombas pueden presentar problemas con las suspensiones, como el taponamiento de la válvula de desagüe donde el acceso es muy limitado. Para reducir el volumen de drenaje a través del tapón de drenaje en la bomba, la mayor parte del líquido se puede drenar a través de conexiones en la tubería de descarga de succión. (Figura 2.11) (Foster Wheeler, 1982)

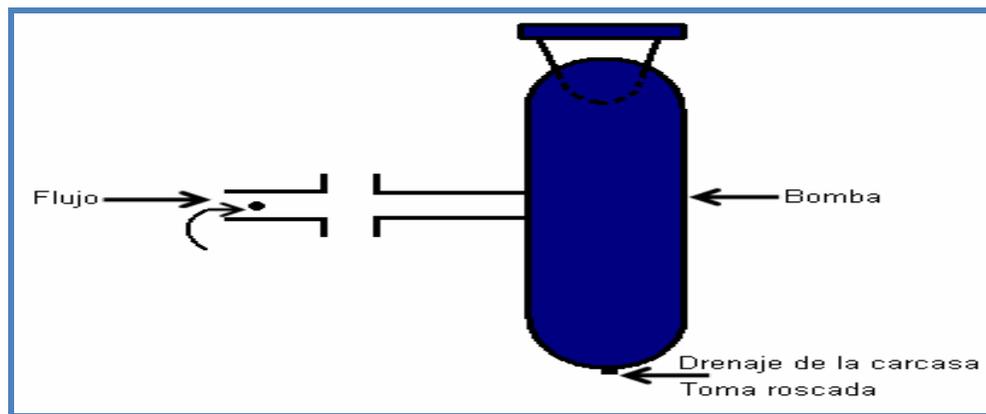


Figura 11. Tipo de desagüe en bombas. (Foster Wheeler, 1982)

Existen líneas de suspensiones que requieren que las líneas de drenaje sean trazadas con vapor. El vapor de calentamiento debe ser instalado de tal manera que las líneas estén completamente trazadas eliminando los puntos fríos locales. Puede ser necesario rediseñar, cuando las condiciones lo ameritan, los soportes para los tubos y estructuras de acero que entren en contacto directo con las líneas de suspensiones.

2.8.5.8. Bridas/Accesorios

El enfoque general para minimizar las restricciones en el flujo, a veces requiere longitudes casi extremas. Algunas mezclas pueden ser química o biológicamente activos y no debe permitirse que ocurra su deposición. Por lo tanto, hay que considerar el uso de las juntas soldadas o con juntas de cara completa, sin accesorios atornillados, etc.

Adicionalmente, la selección de las válvulas puede ser incluso más crítica, debido a que si en una línea que conduce a una válvula, se sedimenta una suspensión activa, ésta podría formar polímeros o compuestos más complejos que imposibilitarían la apertura o cierre de la válvula.

La decisión del uso de una válvula debe basarse en la importancia relativa en cada caso. El uso de conexiones de tipo desmontable para el montaje de ramales con válvula también debe ser considerado; de hecho cualquier método que reduce los puntos muertos y la consiguiente acumulación de los sólidos deben ser investigadas y aplicadas, siempre que sea posible. (Foster Wheeler, 1982)

2.8.5.9. Acceso

En algunas circunstancias puede ser necesario instalar una válvula de accionamiento manual para mantener la mezcla en un sistema, en caso de ocurrir una condición problemática. Esta válvula debe ser de fácil acceso para la acción rápida.

Se deberá proporcionar acceso a los puntos donde se puede producir taponamiento para permitir el lavado por varillas, etc.

Las varillas pueden ser útiles en ciertas condiciones de la suspensión. Sólo se debe instalar con el acuerdo previo del “jefe de tuberías”. La instalación de las varillas por sí misma ofrece excelentes condiciones para la acumulación de depósitos de lodo; por lo que su uso debe limitarse al mínimo. Una mejor solución para el diseñador es instalar bridas para permitir que la línea sea desarmada y posibilitar la limpieza por varillas. Ciertas suspensiones pueden ser sólo removidas con un enjuague por solvente; en estas condiciones los puntos para la introducción de las varillas no deben ser instaladas o no son necesarias.

2.8.5.10. Efluentes

En una fase temprana del diseño, se debe prestar atención a la posible segregación en el tratamiento de efluentes, de las líneas de drenaje de equipos, aguas de lavado y las aguas superficiales que pueden estar contaminadas con partículas en suspensión. Esto incluirá referencias al diseño de las alcantarillas, canales de drenaje, etc. (Foster Wheeler, 1982)

2.9. Velocidad Crítica de Sedimentación

La velocidad crítica de deposición se define como la velocidad que separa el flujo de lecho deslizante (donde las partículas viajan deslizándose, arrastrándose y saltando junto a la pared del tubo), del flujo en el cual las partículas forman un lecho estacionario incipiente (figura 2.12). La velocidad crítica de deposición (V_c) es uno de los parámetros más importantes a conocer en el diseño de transporte hidráulico de sedimentos por tuberías. A pesar de su importancia aún no existe una teoría completa para su predicción, debido a que la velocidad crítica de deposición de partículas en un fluido en movimiento, depende del comportamiento turbulento del flujo de la mezcla transportada. (Zambrano, 2009)

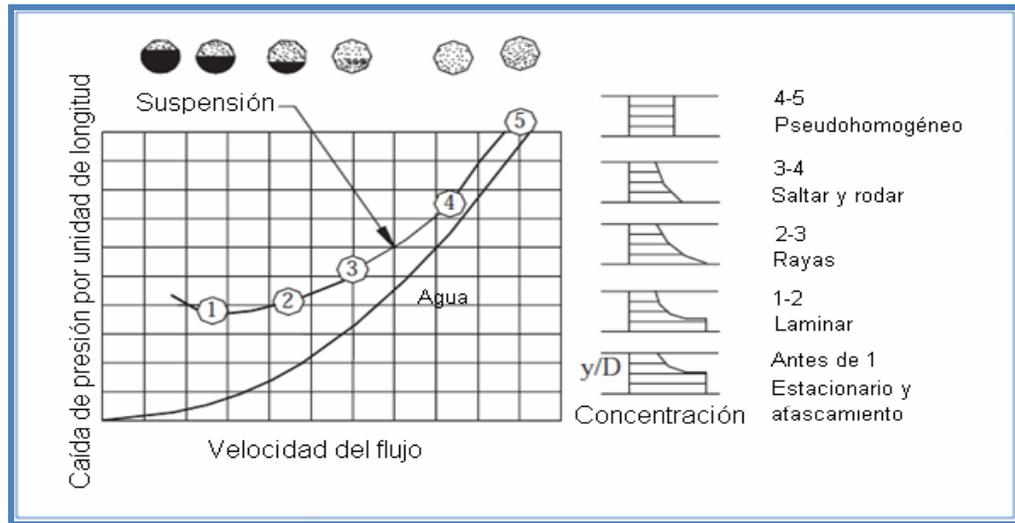


Figura 12. Velocidad de flujo con respecto a la caída de presión (Warman International LTD, 2000)

2.10. Dimensionamiento de Líneas que Manejan Suspensiones

El problema para el dimensionamiento de líneas de proceso que transportan suspensiones, es seleccionar una velocidad de flujo lo suficientemente alta como para evitar la sedimentación de sólidos; pero no tan alta como para que la caída de la presión y la tasa de erosión no sea excesiva. La velocidad crítica de la suspensión se relaciona con la velocidad de sedimentación de las partículas de sólidos gruesos y el grado de turbulencia en la tubería. Por lo tanto, la velocidad crítica de sedimentación aumenta con el tamaño de las partículas, con la gravedad específica y con la concentración de la suspensión.

A continuación se definen algunos tipos de velocidades propias del flujo de fluidos con suspensiones:

► Velocidad de la fase sólida sedimentada

Ocurre cuando el líquido se está moviendo lo suficientemente rápido para mover los sólidos que yacen en el fondo de la tubería.

► Velocidad de salto de la partícula, V_{SA}

Ocurre cuando las partículas sólidas en varias ocasiones son recogidas por el fluido, el cual las arrastra y luego las vuelve a depositar a lo largo de la tubería.

► Velocidad de la suspensión de la partícula, V_M

Es la velocidad más baja a la que se recogen todos los sólidos y permanecen en suspensión; por lo tanto, es la velocidad mínima que se utilizará para determinar el tamaño de la línea. Es difícil determinarla experimentalmente, sobre todo cuando las partículas tienen una amplia distribución de tamaño.

► Velocidad de depósito

Ocurre cuando las partículas empiezan a asentarse a medida que el flujo disminuye. No es necesariamente la velocidad de la suspensión.

► Velocidad crítica de sedimentación, V_C

Es la velocidad que corresponde a un mínimo en la caída de presión, en función de la curva de velocidad de flujo. A menudo es la misma V_M . La velocidad crítica (V_C) es a veces superior a la velocidad de la suspensión de modo que su uso resulta en un diseño seguro, pero esto no es siempre el caso. A menudo, la suspensión y velocidades críticas son efectivamente las mismas. La determinación experimental de la velocidad crítica no requiere la observación directa del patrón de flujo.

► Velocidad de homogeneización, V_S

En teoría, esta es la velocidad a la cual los sólidos se distribuyen uniformemente a través de la sección de la tubería de flujo horizontal. En la práctica,

es la velocidad a la que el perfil de concentración alcanza cierto grado de uniformidad arbitraria. La velocidad de homogeneización también puede definirse como aquella en que la caída de presión es la misma que tendría un líquido de igual densidad que la suspensión y la viscosidad del agua. El uso de la velocidad de homogeneización por lo general se traducirá en un diseño que es demasiado conservador, con respecto al mantenimiento de sólidos en suspensión.

► Velocidad de sedimentación

Es la velocidad terminal de una partícula sólida al caer bajo la fuerza de gravedad a través de una gran cantidad de líquido, sin la presencia cercana de otras partículas. (Foster Wheeler, 1982)

2.10.1. Ecuaciones de Velocidades

No es posible recomendar cualquier fórmula que pueda aplicarse en general a todos los casos. Sin embargo, a continuación se exponen algunas de las fórmulas disponibles. (Foster Wheeler, 1982)

Para bajas concentraciones de partículas esféricas, la velocidad crítica de sedimentación, V_C , de una partícula individual viene dada por la siguiente expresión:

$$V_C = \sqrt{\frac{4}{3} \times \frac{gd}{C_D} \times \frac{(SG_s - 1)}{SG_L}} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

V_C =velocidad crítica de sedimentación, pie/s

g = aceleración debida a la gravedad, pie/s²

d = diámetro de partícula, pie

C_D = coeficiente de arrastre

SG_S : densidad específica de la suspensión

SG_L : densidad específica del líquido

El coeficiente de arrastre, C_D , se puede evaluar mediante el cálculo del número de Reynolds (en función del diámetro de partícula), Re' , así: (Foster Wheeler, 1982)

$$Re' = \frac{\rho V_c d}{\mu} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$\text{Para } Re' < 0,2; C_D = \frac{24}{Re'} \quad \text{Ley de Stokes} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$0,2 < Re' < 500; C_D = \frac{24}{Re'} (1 + 0,15 Re'^{0,687}) \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$500 < Re' < 200.000; C_D = 0,44 \quad \text{Ley de Newton} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde:

Re' = número de Reynolds de la partícula

C_D = coeficiente de arrastre

ρ = densidad, lb/pie³

μ = viscosidad, lb/s*pie

Para altas y medianas concentraciones de sólidos, la sedimentación de las partículas individuales se ven obstaculizadas por la proximidad de otras partículas. Una aproximación razonable de la velocidad de sedimentación se puede obtener con el cálculo previo del Re' (Ec. 2.2), siempre que la densidad y viscosidad del líquido sean sustituidas por la densidad y viscosidad aparente de la pasta.

Las gráficas de viscosidad para partículas esféricas en función de la concentración de sólidos de la suspensión, proporciona un método por el cual la viscosidad de las suspensiones puede estimarse a partir de la viscosidad del líquido y la concentración de sólidos. Sin embargo, en la determinación exacta de la velocidad de sedimentación, especialmente para las partículas de forma irregular, se deben utilizar los procedimientos experimentales.

Para predecir la velocidad de homogeneización, V_s , se sugiere usar las siguientes formulas: (Foster Wheeler, 1982)

$$V_s = 11,9V_c^{0,3}D^{0,5}d^{-0,25} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

$$V_s = 38,7V_c^{0,33}D^{0,33} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Donde:

V_s = velocidad de homogeneización, pie/s

V_c : Velocidad crítica de sedimentación, pie/s

D = diámetro de tubería, pie

d = diámetro de partícula, pie

Rango de Ec. 2.6: para un diámetro de partícula menor a 149 micrones

Rango de Ec. 2.7: para un diámetro de partícula mayor a 149 micrones

Para determinar la velocidad de la suspensión de la partícula se recomienda la siguiente fórmula:

$$V_M = 17 V_c \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Donde:

V_M = velocidad de suspensión de la partícula, pie/s

V_C = velocidad crítica de sedimentación, pie/s

La velocidad de salto de la partícula (V_{SA}), puede calcularse por la siguiente expresión, la cual es válida para partículas mayores de 250 micrones y concentraciones superiores al 10% en volumen: (Foster Wheeler, 1982)

$$V_{SA} = 10,5 D^{0,5} \left[\frac{(\rho_S - \rho_L)}{(\rho_L)} \right]^{0,5} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Donde:

V_{SA} = velocidad de salto de la partícula, pie/s

D= diámetro de tubería, pie

SG_S : densidad específica de la suspensión

SG_L : densidad específica del líquido

2.10.1.1. Suspensiones de NO-SEDIMENTACIÓN

La velocidad que debe ser calculada para las suspensiones de no-sedimentación es la velocidad de transición viscosa, V_T . Esta velocidad marca la transición de un régimen laminar a un patrón de flujo turbulento.

El diseño de un sistema de tuberías para la operación por debajo de la velocidad de transición, sólo es aceptable para una mezcla verdaderamente homogénea, ya que no existen fuerzas turbulentas que mantengan las partículas en suspensión, incluso si solo hay pequeñas cantidades de partículas heterogéneas. En la práctica, existen muy pocas mezclas verdaderamente homogéneas; por lo cual, se puede concluir que ningún sistema debe estar diseñado para una velocidad por debajo de V_T .

Como se ha indicado antes, la mayoría de las suspensiones de no-sedimentación exhiben propiedades de flujo newtoniano. Para las líneas relativamente cortas que se encuentran en la planta de proceso es adecuado tratar las suspensiones como plásticos de Bingham. Si bien los fluidos plásticos de Bingham son similares a los fluidos no newtonianos, en que existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte, la diferencia es que requieren de un esfuerzo de corte finito para iniciar el flujo y superar la rigidez del fluido.

Se recomienda que la velocidad de flujo (V) sea de 3 pies por segundo mayor que la velocidad de transición V_T . (Foster Wheeler, 1982)

2.10.1.2. Limitaciones de la Velocidad Crítica de Sedimentación

Las suspensiones que contienen esencialmente partículas finas (en su mayoría menores a 50 micrones (0,05 mm)) son consideradas como soluciones homogéneas y normalmente se pueden evaluar sin tener en cuenta la suspensión. En altas concentraciones, sin embargo, estos lodos con frecuencia exhiben propiedades de flujo no newtoniano y requieren una consideración especial en la determinación del dimensionamiento adecuado de tuberías y parámetros del sistema.

Las suspensiones en las cuales predominan las partículas mayores a 50 micrones se consideran en general como una solución de lodos (heterogénea), que es el caso en la mayoría de aplicaciones de bombeo de suspensiones.

Las suspensiones que contienen partículas sólidas esencialmente más gruesas que 50 micrones, son transportadas en suspensión por un líquido en una tubería, proporcionando una velocidad promedio (V). A cualquier velocidad por debajo de la velocidad crítica, los sólidos se depositan a lo largo de la tubería. Esto se traduce en

incrementos de pérdidas por fricción en la tubería, reducción de caudal y puede conducir a una obstrucción en la tubería. (Fluor Daniel, 1996)

2.10.2. Pérdidas de Carga por Fricción (h_f) en Suspensiones Homogéneas (Partículas Esencialmente más Finas que $50\mu\text{m}$)

A concentraciones suficientemente bajas, las pérdidas por fricción serán similares a la del agua clara y pueden ser estimadas por el mismo método empírico que se aplica a la categoría "A" de suspensiones heterogéneas.

A concentraciones suficientemente altas, la característica de elasticidad en gran medida influye en el valor de la pérdida por fricción. (Warman International LTD, 2000).

2.10.3. Pérdidas de Carga por Fricción (h_f) en Suspensiones Heterogéneas: Categoría "A"

La categoría "A" se refiere a suspensiones con partículas esencialmente más gruesas que $50\mu\text{m}$, pero menores que $300\mu\text{m}$ y con una concentración de sólidos en peso de 0 a 40%. Las curvas típicas de pérdidas por fricción de esta categoría se ven ilustradas en la figura 2.13.

Los análisis de datos sobre las pérdidas por fricción indican que para cualquier concentración dada de sólidos, las pérdidas por fricción para las suspensiones son numéricamente mayores que las pérdidas por fricción para el agua, para velocidades que se encuentren por debajo de $1,30V_c$, tal como se muestra en la figura 2.13. Sin embargo, el valor de la pérdida por fricción no cae por debajo de un mínimo a bajas velocidades, debido al efecto de los sólidos que se depositan en la tubería. Este mínimo se produce aproximadamente a $0,70V_c$, donde la pérdida por fricción de la

suspensión es aproximadamente igual a la pérdida por fricción del agua, a la velocidad crítica de sedimentación de la mezcla.

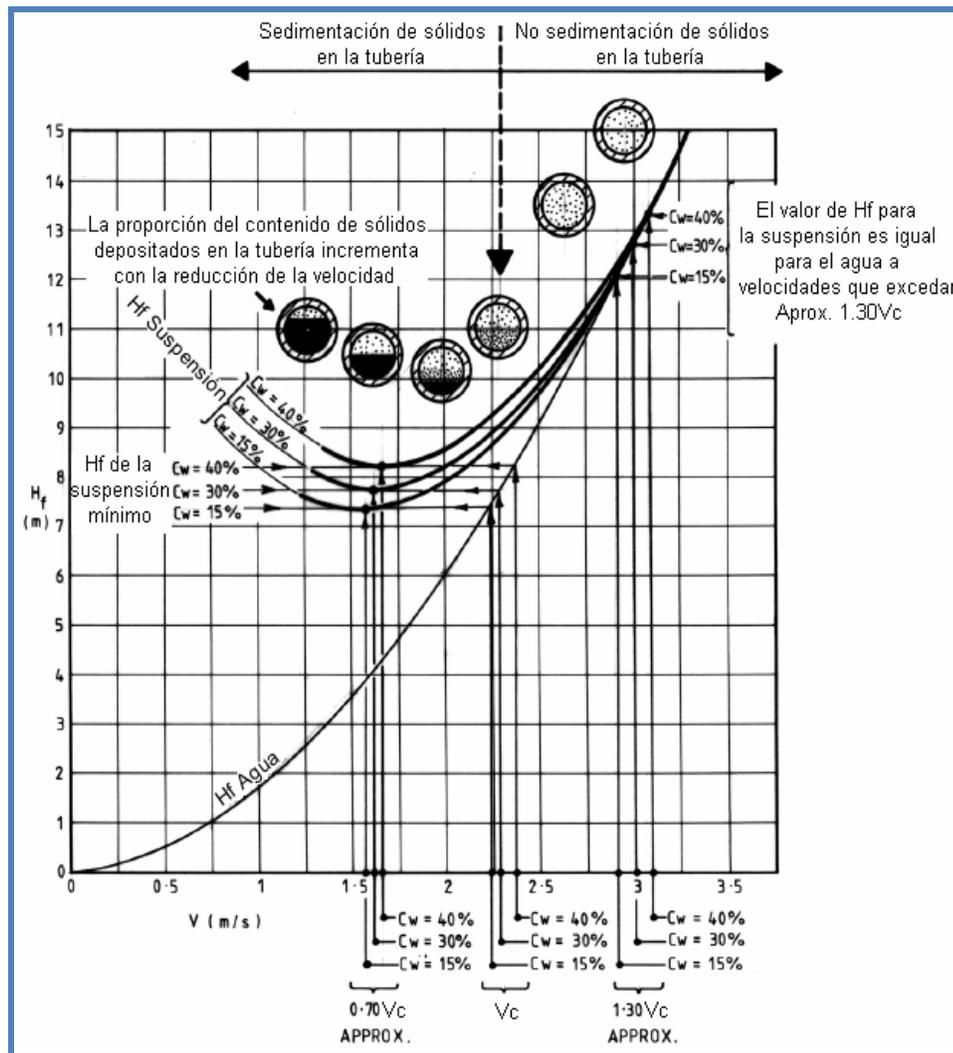


Figura 13. Curvas típicas de pérdidas por fricción para suspensiones heterogéneas categoría "A". (Warman International LTD, 2002)

2.10.4. Pérdidas de Carga por Fricción (h_f) en Suspensiones Heterogéneas: Categoría "B"

La categoría "B" se refiere a suspensiones con partículas esencialmente más grandes que $50\mu\text{m}$ y más finas que $300\mu\text{m}$, pero con concentraciones en peso mayores de 40%. En general, las pérdidas de carga por fricción de esta categoría son mucho mayores que para la categoría "A", debido a que aumentan en gran parte por fricción de las partículas sobre las paredes de la tubería. Este efecto generalmente se incrementa con el aumento de la concentración de sólidos (C_w), y al estar fuertemente influenciado por una serie de variables, como por ejemplo la gravedad específica del sólido, la gravedad específica del líquido, la presencia de partículas más grandes que $50\mu\text{m}$, y la carencia del análisis real granulométrico de sólidos presentes, no hace posible proporcionar un método simple de estimación empírica de pérdidas por fricción.

En general, los valores de pérdidas por fricción varían dentro de un rango, comenzando con valores aproximadamente iguales a las aplicables a la categoría "A" para una concentración de sólidos $C_w = 40\%$, a valores de hasta el doble de la categoría "A", para velocidades que exceden V_c . En consecuencia, los valores de pérdidas por fricción para suspensiones categoría "B" a menudo deben ser estimados; luego se ajustan con un factor de "experiencia".

Los valores de pérdidas por fricción se estiman primero como si fuesen para la categoría "A", luego se calcula el valor del parámetro de limitación de velocidad crítica (FL); con este parámetro se calcula (V_c) y posteriormente se asocian los valores de C_w en exceso con el valor de $C_w = 30\%$. (figura 2.13)

Los verdaderos valores de las pérdidas por fricción pueden ser del doble o más de los valores estimados. Si bien esto crea el riesgo de cometer un error importante en

la estimación de las pérdidas de carga (h_f), el error global en la estimación de carga dinámica total (H) es relativamente pequeño, si los otros componentes de H (por ejemplo, la carga estática neta y la velocidad de salida), al combinarse, representan la mayor parte de la carga dinámica total requerida por el sistema.

2.10.5. Pérdidas de Carga por Fricción (h_f) en Suspensiones Heterogéneas: Categoría "C"

La categoría "C" se refiere a suspensiones con partículas más gruesas que $300\mu\text{m}$ y con concentraciones en peso de 0 a 20%.

Generalmente, las pérdidas de carga por fricción para las mezclas de categoría "C" son también mucho más altas que para las suspensiones de categoría "A". Las pérdidas de carga por fricción de estas suspensiones se calculan sobre la base de la velocidad mínima promedio para el diseño pero no menos que V_c cuando el parámetro de limitación de la velocidad crítica (FL) es igual a 1,4.

Para la velocidad crítica de sedimentación y para velocidades superiores a esta velocidad, las pérdidas de carga por fricción se toman como numéricamente igual a 1,10 de las pérdidas por fricción para el agua; es decir, numéricamente 10% más alta que el h_f estimada para el agua.

2.10.6. Pérdidas de Carga por Fricción (h_f) en Suspensiones Heterogéneas: Categoría "D"

La categoría "D" es referida a suspensiones con partículas mayores de $300\mu\text{m}$ y con C_w mayores al 20%. En general, las pérdidas de carga por fricción para las suspensiones de la categoría "D" son más altas que para la categoría "A". Los valores de las pérdidas de carga por fricción pueden ser estimadas inicialmente por el mismo

método que para la categoría “A”. Sin embargo, las pérdidas por fricción de una suspensión real pueden variar desde valores cercanos a los de la categoría “A”, hasta tres veces o más los de una categoría de suspensiones “A”, (para velocidades superiores a V_C). En consecuencia, la velocidad y la potencia de bombeo deben ser cuidadosamente revisadas.

2.10.7. Problemas Típicos para el Ingeniero de Procesos

Se han desarrollado un gran número de correlaciones para las suspensiones de sedimentación y de no-sedimentación, en un intento por proporcionar ecuaciones universales para dimensionar las líneas con pocos datos de diseño. Estas correlaciones pueden dar resultados bastante buenos, siempre que la suspensión y el tamaño de línea sean similares a los utilizados en los experimentos en que se basan las correlaciones. Sin embargo, si se aplica a diámetros diferentes de tuberías, tales correlaciones pueden ser erróneas.

En el caso de las líneas de planta de proceso, el sobredimensionamiento no es crítico, pero obviamente debe evitarse en lo posible. Normalmente las propiedades de los sólidos, tales como el tamaño de distribución de partículas y forma de las partículas, no están disponibles para el ingeniero de proceso.

Si tal información no está disponible, será necesario basar las estimaciones de las velocidades de diseño en cifras utilizadas en proyectos anteriores para mezclas similares, y en el uso de correlaciones teóricas en un intento de verificar estas estimaciones. El sólo uso de correlaciones acarrea errores de diseño debido a que poseen un 25% de exactitud para estimar las velocidades críticas.

El proceso HDHPLUS involucra distintas líneas que manejan suspensiones, cuyos contenidos de sólidos y viscosidades varían ampliamente dependiendo de las

temperaturas de operación, conversión, arranque o paro de operaciones, fuente de alimentación y otros parámetros.

CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL TRABAJO

El objetivo de este trabajo consistió en evaluar las líneas de manejo de suspensiones del proyecto conversión profunda de la Refinería Puerto La Cruz, mediante una hoja de cálculo.

Para la realización del presente trabajo, en primer lugar se investigaron y analizaron todos los criterios de diseño presentados en los manuales de diseño de las compañías Weir, Flygt, Fluor Daniel y Foster Wheeler, para manejo de suspensiones a través de tuberías. También se revisaron textos especializados en suspensiones desarrollados por INTEVEP.

3.1. Análisis de los Problemas Asociados al Régimen de Flujo en las Líneas de Transporte de Suspensiones

La unidad 79 (*Residue Work-up*) trabaja con los dos trenes provenientes de la unidad de hidroconversión (Unidad 76). Las características de las suspensiones a utilizar dependen de la conversión obtenida en tal unidad que puede ser de 85% ó 92%.

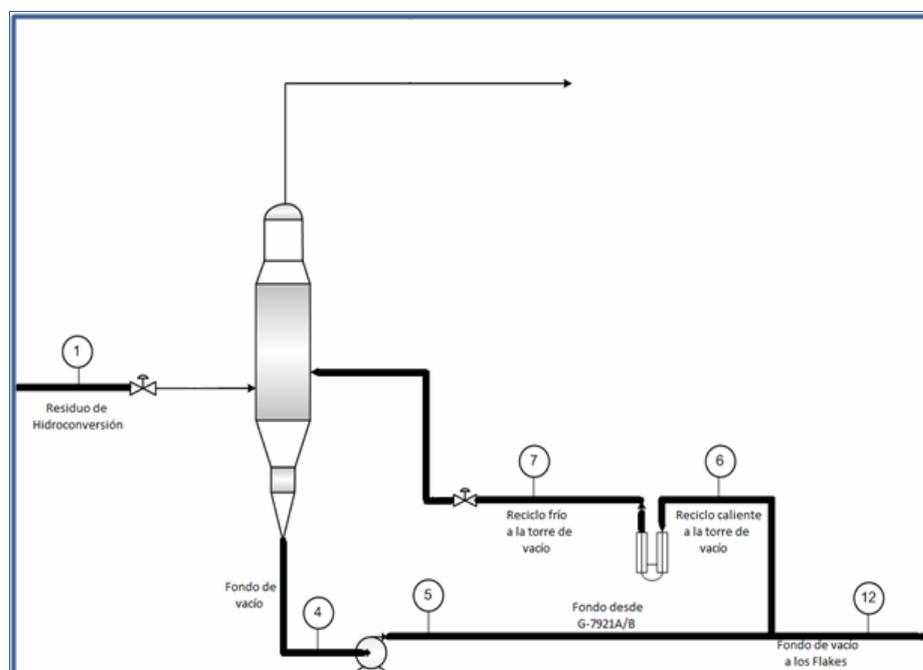
En las tablas A.1 y A.2, se muestran las propiedades de las líneas a estudiar. La unidad 79 cuenta con 15 líneas principales, de las cuales 6 manejan suspensiones. En la tabla 3.1 se muestran cada una de las líneas de manejo de suspensiones con su diámetro y porcentaje de sólidos en peso para cada conversión entregados por la consultora de ingeniería “Japanesse Gas Company – JGC”. (PDVSA, 2009)

Tabla 1. Líneas que manejan suspensiones en la unidad 79 (PDVSA, 2009)

Línea No	Servicio	Diámetro, pulg	%Cw a 85 % de conversión	%Cw a 92 % de conversión
1	Residuo de hidroconversión	5	5,84	8,66
4	Fondo de vacío	20	18,32	35,33
5	Fondo de vacío desde G-7921A/B	12	18,27	35,23
6	Reciclo caliente a la torre de vacío	12	18,27	35,23
7	Reciclo frío a la torre de vacío	12	18,27	35,23
12	Fondo de vacío a la formación de hojuelas	4	18,27	35,23

Posteriormente estas líneas serán analizadas con una hoja de cálculo desarrollada como parte de este trabajo, para detectar la presencia de problemas relacionados con el régimen de flujo y la presencia de sólidos.

A continuación se muestra un esquema con las líneas estudiadas de la unidad de *Residue Work-up* (Unidad 79) del proyecto Conversión Profunda.

**Figura 14.** Representación de las líneas estudiadas.

En las tablas A.3, A.4 y A.5 se muestran las válvulas y accesorios de las líneas estudiadas tomadas de los diagramas de proceso e instrumentación, observándose que son adecuados para una línea que maneje suspensiones, según las recomendaciones establecidas de la teoría. La afirmación anterior viene sustentada por las siguientes razones:

a) Las ramificaciones de las líneas están situadas en la parte superior de las líneas, como es recomendado.

b) En los DTI'S estudiados se muestran los puntos de alivio y lavado para cada una de las líneas de acuerdo a lo recomendado para líneas de este servicio. También se pudo constatar la presencia de llamados y notas, indicando que los codos deben cumplir con la condición de 5D para las curvas en las líneas, teniendo como resultado la ausencia de puntos muertos en las mismas. Cabe resaltar que no se tienen los ángulos de inclinación de las líneas para poder determinar el efecto del enrutamiento de las líneas.

c) Los elementos de medición de caída de presión son apropiados para las líneas 1, 4, 5, 7 y 12, exceptuando a la línea de reciclo caliente a la torre de vacío, por la presencia de un medidor de placa orificio, no recomendado para este tipo de trabajos. No se contó con la información necesaria para verificar el acceso a las válvulas, accesorios y bombas.

Las características de los flujos a manejar, corresponden a fluidos no-newtonianos comportándose como una mezcla pseudo-homogénea de acuerdo a la teoría (cumple con los rangos de éste régimen), ya que depende del cambio de porcentaje de concentración y se manejan entre diámetros de partículas que van desde $282\mu\text{m}$ hasta $850\mu\text{m}$. En este régimen, a pesar de considerar partículas pequeñas, al aumentar su concentración éstas tienden a irse hacia el fondo de la tubería, provocando en un primer paso pequeños sedimentos que luego son arrastrados por el flujo, para luego provocar taponamientos en válvulas,

accesorios y equipos. No se conoce si estos taponamientos pueden ser removidos en su totalidad por lavado o baqueteo, lo cual pone en riesgo el funcionamiento de las líneas.

Por otra parte, no se cuenta con datos de tamaño de partícula adecuada para la línea; este parámetro junto con la concentración de sólidos son los más importantes para la determinación de la velocidad crítica de sedimentación. En vista de esto, se supuso el promedio entre el rango antes dicho (424micrones), con la cual se realizaron todos los cálculos aún sabiendo que de él depende la veracidad de los resultados.

3.2. Ecuaciones Aplicables al Transporte de Fluidos Bifásicos (Líquido-Sólido), que se Ajusten a los Rangos Requeridos por PDVSA

A partir de las ecuaciones aplicables al transporte de fluidos bifásicos encontradas en los manuales de diseño anteriormente mencionados, se elaboró un procedimiento secuencial, de todos los pasos que ejecuta el programa para establecer las velocidades críticas de sedimentación de las partículas sólidas.

Tabla 2. Ecuaciones para la determinación de velocidad crítica de sedimentación.

Procedimiento	Ecuación	Rango de aplicación	Observaciones
Foster Wheeler	$V_c = \sqrt{\frac{4}{3} \times \frac{g \times d}{C_D} \times \frac{(SG_s - SG_m)}{SG_m}}$	Tamaño de partícula <250 μm	Utilizar una velocidad supuesta a evaluar para comenzar el procedimiento de cálculo.
Flygt	Velocidad crítica de sedimentación tabulada de acuerdo al diámetro de partícula y al diámetro de tubería.	Diámetro de tubería ≤ 16"	Utilizar el diámetro de partícula correcto para evitar leer una Vc incorrecta.
Fluor Daniel	$V_c = FL \sqrt{2gD_i \left(\frac{SG_s - SG_l}{SG_l} \right)^{2.5}}$	Amplio	Alta dependencia del tamaño de partícula.
Weir			La velocidad crítica de sedimentación depende

La metodología utilizada por Foster Wheeler no es aplicable para el cálculo de las pérdidas por fricción de categoría "A" ($50\mu\text{m} < d < 300\mu\text{m}$ y $0 < \%C_w < 40$), debido al rango de trabajo de sus ecuaciones ($< 250\mu\text{m}$). Los otros procedimientos pueden estimar las pérdidas por fricción para todas las categorías.

Para el cálculo de las velocidades críticas de sedimentación se cuenta con las ecuaciones desarrolladas por Durand en 1980 (Foster Wheeler, 1982), (ecuación 2.1) utilizadas en la empresa Foster Wheeler. Flygt calcula la velocidad crítica de sedimentación por medio de tablas desarrolladas por la compañía, las cuales están hechas para un $SG_s=3$; por debajo de éste, se debe corregir la velocidad crítica leída. Weir utiliza un método desarrollado por la compañía Warman en base a otra correlación desarrollada por Durand (ecuación 3.14) la cual conlleva un parámetro FL (figura B.1) que en relación con el diámetro interno de la tubería se puede calcular la velocidad crítica. Mientras que Fluor Daniel realiza el cálculo con la misma correlación, pero con un ajuste de FL diferente al utilizado por Weir (figura B.2). Estas ecuaciones se ajustan a los porcentajes de sólidos en peso y a los diámetros de partículas utilizados en el proyecto de Conversión Profunda.

Para realizar dimensionamiento adecuado de una línea que maneje suspensiones, se debe cumplir con dos condiciones: (Warman International LTD, 2002)

a) La velocidad de flujo debe ser superior a la velocidad crítica de sedimentación.

b) La relación entre la velocidad de flujo y la velocidad crítica de sedimentación debe estar entre 1,05 y 1,8.

Estas condiciones se deben cumplir con el fin de evitar la sedimentación en el fondo de las líneas.

El propósito de la unidad *Residue Work-up* es producir una suspensión de vacío adecuado para la formación de hojuelas cuando la conversión es de 85%, por ello se tomará como valores críticos o de mayor importancia los diámetros de tuberías reportados en el DTI'S a esta conversión, para así cumplir con el propósito de la torre de vacío.

3.3. Establecimiento de las Velocidades Críticas de Sedimentación de las Partículas Sólidas.

El dimensionamiento de líneas para el manejo de suspensiones puede ser abordado de diferentes maneras. En este caso, la metodología empleada se basa en el desarrollo de las correlaciones empleadas por cuatro empresas diferentes (Foster Wheeler, Flygt, Fluor Daniel y Weir), las cuales tienen distintos criterios de validación de datos que se mostrarán posteriormente.

Bajo este fundamento, el procedimiento de cálculo para las cuatro empresas consiste en determinar la velocidad crítica de sedimentación de la línea y con ella verificar el dimensionamiento de ésta.

El primer paso consiste en obtener toda la información referente a la concentración de sólidos en peso y, opcionalmente, la concentración de sólidos en volumen, propiedades de los fluidos tales como la densidad específica del líquido y del sólido, la viscosidad de la suspensión y el diámetro de partícula del sólido.

Posteriormente debe especificarse el flujo volumétrico que circula a través de la tubería, el cual es convertido a unidades de pie^3/s (ó m^3/s). También debe conocerse el diámetro y la longitud de la tubería a estudiar. La temperatura también debe ser especificada, pero no afectará la muestra de cálculo, debido a que en los cálculos se supone que la línea es isotérmica.

3.3.1. Cálculo del Volumen del Sólido y del Líquido

En la mayoría de los casos se conocen los porcentajes en peso del sólido y del líquido. Para facilitar los cálculos, se toma una base de cálculo de 100 lb (o 100 kg), siendo el volumen del líquido y de los sólidos calculado mediante las siguientes ecuaciones:

$$V_S = \frac{m_S}{\rho_{\text{agua}} \times SG_S} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

$$V_L = \frac{m_L}{\rho_{\text{agua}} \times SG_L} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

Sistema de unidades

	SI	Inglés
V_S : volumen del sólidos	m^3	pie^3
V_L : volumen del líquidos	m^3	pie^3
m_S : masa del sólido	kg	lb
m_L : masa del líquido	kg	lb
ρ_{agua} : densidad del agua	1.000	62,4
	kg/m^3	lb/pie^3

SG_S : densidad específica del sólido, adimensional

SG_L : densidad específica del líquido, adimensional

3.3.2. Cálculo de la Densidad de la Suspensión

La densidad de la suspensión puede ser obtenida a partir del volumen de sólido y del líquido, por medio de la siguiente ecuación:

$$\rho_m = \frac{V_{\text{total}}}{V_S + V_L} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Donde:

Sistema de unidades

	SI	Inglés
ρ_m : densidad de la suspensión	kg/m^3	lb/pie^3
V_{total} : volumen total	m^3	pie^3
V_S : volumen de los sólidos	m^3	pie^3

V_L : volumen del líquido

m^3

pie^3

3.3.3. Cálculo de la Concentración de Sólidos en Volumen

Para obtener la concentración de sólidos en volumen se aplica la siguiente ecuación:

$$\%C_v = 1 + \frac{SG_m \times (\%C_w - 1)}{SG_L} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Donde:

$\%C_v$: porcentaje concentración de sólidos en volumen, adimensional

SG_m : densidad específica de la suspensión, adimensional

$\%C_w$: porcentaje concentración de sólidos en peso, adimensional

SG_L : densidad específica del líquido, adimensional

3.3.4. Cálculo de la Densidad Específica del Sólido

La fracción de volumen de sólidos se puede calcular mediante el empleo de la siguiente ecuación:

$$SG_s = \frac{\%C_w \times SG_m}{\%C_v} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Donde:

$C_v\%$: porcentaje concentración de sólidos en volumen, adimensional

SG_m : densidad específica de la suspensión, adimensional

$C_w\%$: porcentaje concentración de sólidos en peso, adimensional

SG_s : densidad específica de la sólido, adimensional

3.3.5. Cálculo de la densidad específica de la suspensión

La densidad específica de la suspensión se obtiene al dividir la densidad de la suspensión entre la densidad del agua en las unidades correspondientes, tal como sigue:

$$SG_m = \frac{\rho_m}{\rho_{\text{agua}}} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Donde:	Sistema de unidades	
	SI	Inglés
ρ_m : densidad de la suspensión	kg/m ³	lb/pe ³
ρ_{agua} : densidad del agua	1.000 kg/m ³	62,4 lb/pe ³
SG_m : gravedad específica de la suspensión, adimensional		

3.3.6. Velocidad Crítica de Sedimentación de Líneas Según Foster Wheeler

A partir de las correlaciones desarrolladas por Foster Wheeler para el cálculo de la velocidad crítica de sedimentación, se procedió a realizar una hoja de cálculo en Microsoft Excel, que trabaja de la siguiente forma:

3.3.6.1. Determinación del Régimen de Flujo

Usando la figura B.3, se entra a la gráfica con el diámetro de partícula y la gravedad específica, con el fin de determinar si es una suspensión de sedimentación o una de no-sedimentación.

Se debe suponer una velocidad de trabajo para probar que su uso es aceptable en el dimensionamiento de las líneas. En este caso, la velocidad supuesta se tomó como la velocidad crítica calculada por el programa según Weir, cuando se cumplía con las condiciones de $V > V_c$ y el rango de $1,05 < V < 1,8$

3.3.6.2. Estimación del Diámetro Requerido de la Tubería

Foster Wheeler permite estimar el diámetro requerido de la tubería utilizando como base la velocidad anteriormente supuesta, como sigue:

$$D_{req} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \times \frac{Q_V}{V_{sup}}} \quad (\text{Ec.3.7})$$

Donde:	Sistema de unidades	
	SI	Inglés
D_{req} : diámetro requerido	m	pie
Q_V : flujo volumétrico de la suspensión	m ³ /s	pie ³ /s
V_{sup} : velocidad supuesta	m/s	pie/s

3.3.6.3. Estimación de la Velocidad de Flujo

Despejando v_{sup} (velocidad supuesta) de la ecuación 3.7, se puede obtener la velocidad de flujo si se sustituye el diámetro requerido por el diámetro interno seleccionado en la tabla A.6. Esta será la nueva velocidad a estudiar, la cual se comparará con las velocidades posteriores según el método de cálculo desarrollado por Foster Wheeler.

3.3.6.4. Cálculo del Número de Reynolds de la Partícula

De acuerdo a la ecuación 2.2 el Reynolds de la partícula se calcula de la siguiente forma:

$$Re' = \frac{\rho_m V_c d}{\mu}$$

3.3.6.5. Cálculo del Coeficiente de Arrastre

A partir del número de Reynolds es posible realizar el cálculo del coeficiente de arrastre de acuerdo a los siguientes rangos:

$$\text{Para } Re^* < 0,2; C_D = \frac{24}{Re^*} \text{ Ley de Stokes}$$

$$0,2 < Re^* < 500; C_D = \frac{24}{Re^*} (1 + 0,15Re^{*0,687})$$

$$500 < Re^* < 200.000; C_D = 0,44 \text{ Ley de Newton}$$

Para efectos de cálculo en el dimensionamiento de las líneas de manejo de suspensiones del proyecto, el coeficiente de arrastre se supuso como 0,44 debido a que el número de Reynolds de la partícula es mayor a 500, para asegurar la turbulencia en fluido y evitar la sedimentación de las partículas sólidas presentes en la suspensión.

3.3.6.6. Estimación de la Velocidad Crítica de Sedimentación

La metodología propuesta por Foster Wheeler es la única que utiliza correlaciones para estimar las velocidades que se aplican sobre el fluido; en este caso se estima la velocidad crítica de sedimentación con el fin de determinar la velocidad a la cual las partículas sólidas se depositan en el fondo de la tubería por efecto de la gravedad. Esta velocidad, de acuerdo a experiencias de diseño, es indicativa de posibles bloqueos en las tuberías.

La velocidad crítica de sedimentación de una partícula individual viene dada por la ecuación 2.1:

$$V_c = \sqrt{\frac{4}{3} \times \frac{g \times d}{C_D} \times \frac{(SG_s - SG_m)}{SG_m}}$$

3.3.6.7. Estimación de la Velocidad de Salto

Durand (1980) desarrolló una correlación para estimar la velocidad de salto para partículas sólidas mayores a 250 micrones y concentraciones superiores al 5%. Esta velocidad permite estimar la velocidad de lavado de la tubería para limpiar los bloqueos de partículas sólidas depositadas en la línea. La velocidad de salto puede ser calculada con la ecuación 2.9:

$$V_{sa} = 10,5 \times D_i^{0,5} \left[\frac{(SG_s - SG_m)}{(SG_m)} \right]^{0,5}$$

3.3.6.8. Cálculo de la Velocidad de Suspensión

Durand (1980) desarrolló una ecuación para la determinación de la velocidad de la suspensión, la cual permite conocer la velocidad más baja a la cual se transporta el fluido. Esta velocidad depende directamente de la velocidad de sedimentación de la suspensión y se calcula la ecuación 2.8:

$$V_{sa} = 17 V_c$$

3.3.6.9. Estimación de la Velocidad de Homogeneización

Para el cálculo de la velocidad de homogeneización por el método de Foster Wheeler, existen dos correlaciones desarrolladas por Newitt y Durand (1980), las cuales pueden ser usadas para diámetros de partículas mayores a 44 micrones y

porcentajes en peso superiores al 10 por ciento. Esta velocidad se puede estimar con las ecuaciones 2.6 y 2.7:

$$V_s = 11,9 V_c^{0,5} D^{0,5} d^{-0,25}$$

$$V_s = 38,7 V_c^{0,33} D^{0,33}$$

3.3.6.10. Comparación de las Velocidades

Se debe comparar la velocidad de flujo, con la velocidad de salto de la partícula y la velocidad de homogenización, tomando en cuenta que la validación de la velocidad de transporte se da cuando esta se encuentra entre ambas velocidades, para asegurar que las partículas sólidas se mantengan suspendidas en la suspensión a lo largo de la tubería.

3.3.7. Velocidad Crítica de Sedimentación de Líneas Según Flygt

En los siguientes puntos se explica paso a paso el procedimiento de cálculo según Flygt.

3.3.7.1. Definición del Sistema

Al igual que el procedimiento seguido por Foster Wheeler se deben definir la concentración de sólidos en volumen o pesos, densidad del sólido, diámetro de tubería, flujo requerido, longitud de tubería y tamaño de sólidos. También se debe especificar la temperatura del fluido que circula por la tubería.

3.3.7.2. Determinación de la Densidad Específica del Líquido

Dado que la densidad específica es la densidad de un material en particular que se normalizó con la densidad del agua, se puede determinar usando el

nomograma (figura B.4) o con las siguientes fórmulas, tomando en cuenta que la concentración de sólidos en peso es opcional para el cálculo:

$$SG_m = 1 + \%Cv (SG_s - 1) \quad (\text{Ec. 3.8})$$

$$SG_m = \frac{SG_s}{SG_s - \%Cw (SG_s - 1)} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Donde:

SG_m : densidad específica de la suspensión

SG_s : densidad específica del sólido

$\%Cw$: porcentaje concentración de sólidos en peso

$\%Cv$: porcentaje concentración de sólidos en volumen

3.3.7.3. Determinación de la Densidad Específica del Líquido

Dado que la densidad específica es la densidad de un material en particular que se normalizó con la densidad del agua, se puede determinar usando el nomograma (figura B.4) o con las siguientes fórmulas, tomando en cuenta que la concentración de sólidos en peso es opcional para el cálculo:

$$SG_m = 1 + \%Cv (SG_s - 1) \quad (\text{Ec. 3.8})$$

$$SG_m = \frac{SG_s}{SG_s - \%Cw (SG_s - 1)} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Donde:

SG_m : densidad específica de la suspensión

SG_s : densidad específica del sólido

$\%Cw$: porcentaje concentración de sólidos en peso

$\%Cv$: porcentaje concentración de sólidos en volumen

Tabla 3. Velocidad crítica de sedimentación (m/s) en función del diámetro de tubería y el diámetro de partícula (d85) a un SG=3. (Flygt Industries, 1999)

Diámetro de tubería		Mesh 65	48	32	24	16	9	<4
pulg	mm	mm 0,2	0,3	0,5	0,7	1	2	>5
1	25	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
2	50	1,3	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
3	75	1,6	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
4	100	1,7	1,9	2	2,1	2,1	2,1	2,1
6	150	1,7	2	2,1	2,4	2,4	2,4	2,4
8	200	1,8	2	2,3	2,5	2,5	2,5	2,5
12	300	1,8	2,1	2,4	2,7	2,8	3	3
16	400	1,8	2,1	2,5	2,8	2,9	3,1	3,6

Si la gravedad específica de la suspensión es diferente de 3, se debe utilizar un factor de corrección leído de la figura B.5. Luego, este factor leído es multiplicado por la velocidad crítica de sedimentación obtenida.

3.3.7.4. Cálculo de la Velocidad de Flujo

En este caso se calcula la velocidad de flujo por la relación que existe entre el flujo requerido para el transporte y el área transversal de la tubería. La velocidad actual debe ser mayor a la velocidad crítica de sedimentación corregida por el factor de la figura B.5. El cálculo se realiza de la siguiente forma:

$$V = \frac{Q_v}{A} \quad (\text{Ec.3.10})$$

Donde:

V: velocidad de flujo

Sistema de unidades

SI Inglés

m/s pie/s

Q_v : flujo volumétrico de la suspensión	m^3/s	pie^3/s
A: área de la sección transversal de la tubería	m^2	pie^2

3.3.8. Velocidad Crítica de Sedimentación de LÍNEAS SEGÚN Fluor Daniel

La metodología de cálculo utilizada por Fluor Daniel para estimar la velocidad crítica de sedimentación de transporte es como sigue a continuación:

3.3.8.1. Datos Requeridos

El procedimiento desarrollado por Fluor Daniel implica el uso de las densidades específicas del líquido y de la suspensión, así como el porcentaje en peso del sólido en la línea que se transporta. Para ello se pueden utilizar las propiedades de los fluidos, a fin de obtener los datos solicitados.

3.3.8.2. Estimación del Parámetro de Velocidad Crítica de Sedimentación

El parámetro de velocidad crítica de sedimentación depende del porcentaje de concentración de volumen de sólidos y del diámetro de partícula, como se muestra en la figura B.2. Se hizo una regresión a dicha curva obteniéndose la siguiente ecuación para realizar el cálculo de FL, como sigue:

$$FL = 1,4 \times \left(1 - e^{\left(-(0,008 + (100 + \%C_v) + 0,86) \cdot (10 \cdot d)^{(0,004 + (100 + \%C_v) + 0,12)} \right)} \right) \quad (\text{Ec. 3.11})$$

El valor resultante de del coeficiente de determinación fue $R^2=0.9989$.

Donde:

FL= parámetro de velocidad crítica de sedimentación, adimensional

%Cv= porcentaje concentración de sólidos en volumen, adimensional

d= diámetro de partícula, mm

3.3.8.3. Selección del Diámetro de la Tubería y Diámetro Interno

En este punto se debe seleccionar el diámetro de la tubería, lo que conllevará al conocimiento del diámetro interno de la misma; dichos parámetros son importantes para este estudio.

3.3.8.4. Cálculo de la Velocidad de Flujo

La velocidad de flujo se calcula utilizando la ecuación 3.10, mediante la relación entre el flujo volumétrico de la suspensión (pie³/s) y el área de sección transversal de la tubería (pie²).

3.3.8.5. Cálculo de la Velocidad Crítica de Sedimentación

De acuerdo al método desarrollado por Durand, se calcula la velocidad crítica de sedimentación como sigue:

$$V_c = FL \sqrt{2gD_i \left(\frac{SG_s - SG_l}{SG_l} \right)^{2.5}} \quad (\text{Ec. 3.12})$$

Donde:	Sistema de unidades	
	SI	Inglés
V_c : velocidad crítica de sedimentación	m/s	pie/s
g : aceleración debido a la gravedad	9,81 m/s ²	32,2 pie/s ²
D_i : diámetro interno de la tubería	m	pie
SG_s : densidad específica del sólido, adimensional		
SG_l : densidad específica del líquido, adimensional		
FL : parámetro de velocidad crítica de sedimentación, adimensional		

3.3.9. Velocidad Crítica de Líneas Según Weir

Al igual que los procedimientos anteriores, es necesario disponer de los datos requeridos para realizar los cálculos.

3.3.9.1. Cálculo del Caudal Másico

De acuerdo al caudal másico de suspensión que se tenga, se divide o se multiplica por 1,25 para obtener los caudales mínimos y máximos permitidos para la suspensión respectivamente, como sigue:

$$Q_{\min} = \frac{Q}{1,25} \quad (\text{Ec. 3.13})$$

$$Q_N = Q$$

$$Q_{\max} = Q * 1,25 \quad (\text{Ec. 3.14})$$

Donde:	Sistema de unidades	
	SI	Inglés
Q= caudal másico de la suspensión	kg/h	lb/h
Q _{min} = caudal másico mínimo permitido de suspensión	kg/h	lb/h
Q _{max} = caudal másico máximo permitido de suspensión	kg/h	lb/h

3.3.9.2. Cálculo de la Densidad Específica de la Suspensión

La densidad específica de la suspensión se calcula mediante la siguiente relación:

$$SG_m = \frac{SG_L}{1 - \%Cw \times \left(\frac{SG_s - SG_L}{SG_s} \right)} \quad (\text{Ec. 3.15})$$

3.3.9.3. Cálculo de la Concentración en Volumen

Para el cálculo de la concentración en volumen se utiliza la siguiente ecuación:

$$\%Cv = \frac{\%Cw \times SG_L}{SG_s - (\%Cw \times (SG_s - SG_L))} \quad (\text{Ec. 3.16})$$

3.3.9.4. Cálculo del Parámetro de Velocidad Crítica de Sedimentación (FL)

El parámetro de velocidad crítica de sedimentación depende del porcentaje de concentración de volumen de sólidos y del diámetro de partícula, como se muestra en la figura B.1. Se hizo una regresión a dicha curva obteniéndose la siguiente ecuación para realizar el cálculo de FL, como sigue:

$$FL = 1,02 \times \left(1,39825612 \times \%Cv^{0,04391121} + (0,18189282 + 0,0064241 \times \ln(\%Cv)) \times \ln(d) \right) \quad (\text{Ec. 3.17})$$

El valor resultante de del coeficiente de determinación fue $R^2=0.9997$.

3.3.9.5. Cálculo del Diámetro de la Tubería

El diámetro de la tubería depende principalmente del flujo volumétrico que pasa por él; también es posible obtener el diámetro mínimo y el diámetro máximo con el uso del caudal volumétrico mínimo y máximo, respectivamente. A continuación se muestra la ecuación para el cálculo del diámetro nominal:

$$D_{req} = \left(\frac{\frac{4 \times Q_v}{3.600}}{\pi \times FL \left[2 \times g \times \left(\frac{SG_s}{SG_L} - 1 \right) \right]^{0,5}} \right)^{2/3} \quad (\text{Ec. 3.18})$$

3.3.9.6. Cálculo del Área Interna de la Tubería

El área interna de la tubería está referida al área seccional transversal de un cilindro, la cual está expresada en función del diámetro y se muestra de la siguiente forma:

$$A_i = 0,25 \times \pi \times D_i^2 \quad (\text{Ec. 3.19})$$

	Sistema de unidades	
donde:	SI	Inglés
A_i : área interna de la tubería	$\frac{\text{m}^2}{\text{m}^2}$	$\frac{\text{pie}^2}{\text{pie}^2}$
D_i : diámetro interno de la tubería	m	Pie

3.3.9.7. Cálculo de la Velocidad de la Suspensión

La velocidad de flujo se calcula utilizando la ecuación 3.10, mediante la relación entre el flujo volumétrico de la suspensión (pie^3/s) y el área de sección transversal de la tubería (pie^2).

La fórmula para el cálculo de la velocidad crítica de sedimentación requiere que se convierta el caudal a litros por segundo.

3.3.9.8. Estimación de la Velocidad Crítica de Sedimentación

En este punto se estima la velocidad crítica de sedimentación para que luego sea comparada con la velocidad de flujo calculada anteriormente, en donde la velocidad de flujo tiene que ser necesariamente mayor que V_C , a fin de evitar los riesgos de sedimentación en la tubería. La velocidad crítica de sedimentación se calcula mediante el uso de la siguiente correlación:

$$V_c = FL \sqrt{2gD_i \left(\frac{SG_s - SG_l}{SG_l} \right)^{2.5}} \quad (\text{Ec. 3.20})$$

3.4. Verificación del Dimensionamiento de las Líneas de Manejo de Suspensiones de la Unidad 79

Una vez culminado el cálculo de la velocidad crítica de sedimentación (V_c), esta debe ser comparada con la velocidad de flujo (V), en donde se debe cumplir que V sea mayor que V_c . Si se cumple esta condición, se debe calcular la relación V/V_c la cual tiene que ser mayor que 1,05 pero menor que 1,8; si se encuentra en este rango, la línea es adecuada.

3.4.1. Cálculo para la Verificación de la Velocidad Crítica de Sedimentación

Para validar los procedimientos de cálculo expuestos en el punto 3.3, se utilizaron muestras de cálculo desarrolladas por las compañías Foster Wheeler, Flygt y Weir encontradas en sus manuales de diseño para el manejo de suspensiones.

El manual entregado por la empresa Fluor Daniel cuenta sólo con las correlaciones mas no con una muestra de cálculo, por lo cual su validación se hizo comparándola con las muestras de cálculo de las tres compañías anteriormente dichas.

Por otra parte, actualmente no existen especificaciones o normas PDVSA para el dimensionamiento de líneas de manejo de suspensiones sólido-líquido, ya que actualmente no hay una planta donde se manejen este tipo de fluidos bifásicos, requisito indispensable para poder aplicar la metodología de cálculo planteada en el presente trabajo.

La verificación de las metodologías estudiadas consistió en la comparación de los diámetros obtenidos por la hoja de cálculo desarrollada en este trabajo, con los diámetros de las líneas de manejo de suspensiones entregadas por la empresa consultora JGC-Company.

Con los datos extraídos de la tabla A.1 y la tabla 3.3, para una conversión del 85% en la línea "residuo de hidroconversión" proveniente de la unidad 76, se procedió a realizar la muestra de cálculo.

A continuación se muestra en la tabla 3.4 la entrada de datos necesarios para los programas para poder realizar el cálculo de la velocidad crítica de sedimentación y posteriormente comprobar la no sedimentación de sólidos en la línea.

Tabla 4. Entrada de datos, residuo de hidroconversión 85% de conversión (PDVSA, 2009)

Propiedad	Valor	Unidades
Temperatura:	760,55	°F
Caudal másico:	165.687,57	lb/h
%en peso del sólido:	5,84	
Densidad del líquido:	45,40	lb/pie ³
Densidad de la suspensión:	46,76	lb/pie ³
Tamaño de partículas:	424,00	micrones

3.4.2. Muestra de Cálculo para Foster Wheeler

3.4.2.1. Cálculo de la Densidad de la Suspensión

Utilizando el volumen de sólidos y el volumen de líquidos, se calcula la densidad específica de la suspensión mediante la ecuación 3.3.

$$\rho_m = \frac{100 \text{ lb}}{0,0646 \text{ pie}^3 + 2,0740 \text{ pie}^3} = 46,76 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}$$

3.4.2.2. Cálculo del Porcentaje de Sólidos en Volumen

Con el uso de la ecuación 3.4 se calcula el %Cv con la sustitución de la densidad del sólido y del líquido y el porcentaje de sólidos en suspensión para poder obtener luego la densidad específica del sólido:

$$\%C_v = 1 + \frac{\frac{46,76}{62,4} \times (0,0584 - 1)}{\frac{45,40}{62,4}} = 0,0302$$

3.4.2.3. Cálculo de la Densidad Específica del Sólido

Mediante la ecuación 3.5 se calcula el SG_s de la siguiente forma:

$$SG_s = \frac{0,054 \times \frac{46,76}{62,4}}{0,0302} = 1,4494$$

3.4.2.4. Cálculo del Volumen de Sólidos

Para la realización de dicho cálculo se utilizó la ecuación 3.1 y asumiendo una base de cálculo de 100lb.

$$V_s = \frac{5,84 \text{ lb}}{62,4 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3} \times 1,4494} = 0,0646 \text{ pie}^3$$

3.4.2.5. Cálculo del Volumen de Líquidos

Para la realización de dicho cálculo se utilizó la ecuación 3.2.

$$V_L = \frac{94,2 \text{ lb}}{62,4 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3} \times 0,7276} = 2,0740 \text{ pie}^3$$

3.4.2.6. Cálculo del Caudal Volumétrico de la Suspensión

Para realizar el cálculo del diámetro requerido para la línea de manejo de suspensiones, es necesario expresar el caudal en unidades de volumen como sigue:

$$Q_V = \frac{165.687,57 \text{ lb/h}}{3.600 \text{ s}} \times \frac{1}{46,76 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}} = 0,9843 \text{ pie}^3/\text{s}$$

3.4.2.7. Cálculo del Diámetro Requerido

Utilizando el volumen de flujo calculado anteriormente y una velocidad supuesta de 5 pie/s (velocidad crítica según la metodología de Weir cuando se cumple con $V > V_c$ y $1,05 > V > 1,8$), sustituyendo en la ecuación 3.7 se procede a calcular el diámetro requerido.

$$D_{\text{req}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \times \frac{0,9843 \text{ pie}^3/\text{s}}{5 \text{ pie}/\text{s}}} = 0,5006 \text{ pie} \times \frac{12 \text{ pulg}}{1 \text{ pie}} = 6 \text{ pulg}$$

De la tabla A.6, se extrae el diámetro interno para una tubería de cédula 40S comercial, según el diámetro nominal requerido (6 in), obteniéndose un diámetro interno de 6,065 in, para este caso.

3.4.2.8. Cálculo de la Velocidad de Flujo

Habiendo obtenido el diámetro interno se calcula la velocidad de flujo despejándola de la ecuación 3.7 y sustituyendo los valores adecuados, como sigue:

$$V = \frac{4}{\pi} \times \frac{0,9843 \text{ pie}^3/\text{s}}{\left(6,065 \times \frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulg}}\right)^2} = 4,9060 \text{ pie/s}$$

3.4.2.9. Cálculo de la Velocidad Crítica de Sedimentación

Para dicho cálculo es necesaria la obtención de la densidad específica de la suspensión, la cual no es más que el siguiente cálculo:

$$SG_m = \frac{46,76 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}}{62,4 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}} = 0,7494$$

Con éste valor de densidad específica se procede a calcular la velocidad crítica de sedimentación mediante la ecuación 2.1:

$$V_c = \sqrt{\frac{4}{3} \times \frac{32,2 \frac{\text{pie}}{\text{s}^2} \times 0,0197 \text{ pulg}}{0,44} \times \frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulg}} \times \frac{(1,4494 - 0,7494)}{0,7494}}$$

$$= 0,3561 \text{ pie/s}$$

3.4.2.10 Cálculo de la Velocidad de Salto de la Partícula

Para el cálculo de la velocidad de salto también se necesitará la densidad específica de la suspensión calculada anteriormente, sustituyendo los datos en la ecuación 2.9:

$$V_{SA} = 10,5 \times (0,5054 \text{ pie})^{0,5} \left[\frac{(1,4494 - 0,7494)}{(0,7494)} \right]^{0,5} = 7,2149 \text{ pie/s}$$

3.4.2.11. Cálculo de la Velocidad de Suspensión de la Partícula

Utilizando la velocidad crítica de sedimentación calculada anteriormente, se procede a calcular la velocidad de suspensión mediante la ecuación 2.8:

3.4.2.12. Cálculo de la Velocidad Homogenización

Utilizando nuevamente el valor de la velocidad crítica de sedimentación se calcula la velocidad de hominización sustituyendo los valores en la ecuación 2.6:

$$V_s = 11,9 \times (0,3561 \text{ pie/s})^{0,5} \times (0,5054 \text{ pie})^{0,5} \times (0,0014)^{-0,25} \\ = 26,1406 \text{ pie/s}$$

$$V_M = 17 \times 0,3561 \text{ pie/s} = 6,0536 \text{ pie/s}$$

3.4.2.13. Verificación de la Velocidad

La velocidad de flujo (4,9060 pie/s) se encuentra por debajo de V_{SA} (7,2149 pie/s), por lo cual la selección de un diámetro de 6 pulgadas resulta riesgoso para la línea; en este caso se debe evaluar el diámetro superior e inferior directo.

3.4.3. Muestra de Cálculo para Flygt

3.4.3.1. Cálculo del Porcentaje de Sólidos en Volumen

El porcentaje de sólidos en volumen se calcula sustituyendo los valores indicados en la ecuación 3.4:

$$\%C_v = \frac{1 + \frac{46,76}{62,4} \times (0,0584 - 1)}{\frac{45,40}{62,4}} = 0,0302$$

3.4.3.2. Cálculo de la Densidad Específica del Sólido

Mediante la ecuación 3.5 y con el %Cv calculado anteriormente (0,0302) se calcula el SG_s:

$$SG_s = \frac{0,054 \times \frac{46,76}{62,4}}{0,0302} = 1,4494$$

3.4.3.3. Cálculo del Caudal Volumétrico de la Suspensión

Para realizar el cálculo del diámetro requerido para la línea de manejo de suspensiones, es necesario expresar el caudal en unidades de volumen como sigue:

$$Q_v = \frac{165.687,57 \text{ lb/h}}{3.600 \text{ s}} \times \frac{1}{46,76 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}} \times \frac{28,34 \text{ L}}{1 \text{ pie}^3} = 27,8744 \text{ L/s}$$

3.4.3.4. Selección del Diámetro a Evaluar

De la tabla 3.1, el diámetro para la línea de residuo de hidroconversión es de 5'' y el diámetro interno es 5,0470 pulg (tabla A.5). Utilizando el diámetro nominal se lee de la tabla 3.3, e interpolando, se obtiene una velocidad crítica de sedimentación de 2,0116 m/s (6,5996 pie/s) la cual debe ser corregida mediante

un factor leído en la figura B.5 con SG_s igual a 1.449,4 kg/m^3 ; se choca la curva y se lee un factor de 0,5.

3.4.3.5. Corrección de la Velocidad Crítica de Sedimentación

Con la velocidad crítica leída en la tabla 3.3 y el factor leído de la figura B.5, se corrige la velocidad de la siguiente forma:

$$V_{C\text{corregida}} = 6,5996 \text{ pie/s} \times 0,5 = 3,2998 \text{ pie/s}$$

3.4.3.6. Cálculo de la Velocidad de Flujo

La velocidad de flujo es el paso que precede al cálculo de la velocidad de transporte y se calcula con la ecuación 3.10:

$$V = \frac{27,8744 \text{ L/s} \times 1 \text{ m}^3/1000 \text{ L}}{\pi \times (5,0470 \text{ pulg} \times 0,0254 \text{ m/pulg})^2} \times \frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulg}} = 4,4965 \text{ pie/s}$$

3.4.3.7. Relación V/Vc

La relación V/Vc es la segunda condición a cumplir en la línea y se calcula como sigue:

$$\frac{V}{V_c} = \frac{4,9065 \text{ pie/s}}{3,3650 \text{ pie/s}} = 1,46$$

Como se puede ver, se cumple la primera condición al ser V mayor que Vc, lo cual es indicativo de una selección segura de diámetro y cumple con la segunda condición en la cual $1,05 < \frac{V}{V_c} < 1,8$; por lo tanto se tiene una relación de velocidades adecuada para la línea según esta metodología.

3.4.4. Muestra de Cálculo para Fluor Daniel

3.4.4.1. Cálculo del Porcentaje de Sólidos en Volumen

Con el uso de la ecuación 3.4 se calcula el %C_v para poder obtener luego la densidad específica del sólido:

$$\%C_v = 0,0302$$

3.4.4.2. Cálculo de la Densidad Específica del Sólido

Sustituyendo en la ecuación 3.5 se calcula el SG_s:

$$SG_s = \frac{0,054 \times \frac{46,76}{62,4}}{0,0302} = 1,4494$$

3.4.4.3. Cálculo del Caudal Volumétrico de la Suspensión

Para realizar el cálculo del diámetro requerido para la línea de manejo de suspensiones, es necesario expresar el caudal en unidades de volumen como sigue:

$$Q_v = \frac{165.687,57 \text{ lb/h}}{3.600 \text{ s}} \times \frac{1}{46,76 \frac{\text{lb}}{\text{pie}}} = 0,9843 \text{ pie}^3/\text{s}$$

3.4.4.4. Estimación del Parámetro FL

Para la estimación del parámetro de limitación de velocidad de sedimentación para Fluor Daniel (figura B.2) se utiliza la siguiente regresión:

$$FL = 1,4 \times \left(1 - e^{-(0,008 \times (100 - 0,0302) + 0,86) \times (10 - 0,424 \text{ mm})^{(0,004 \times (100 - 0,0302) + 0,86)}} \right)$$

$$= 1,1052$$

Con este valor de FL se calcula la velocidad crítica de sedimentación.

3.4.4.5. Selección del Diámetro a Evaluar

De la tabla 3.1, el diámetro para la línea de residuo de hidroconversión es de 5'' y diámetro interno 5,0470 pulg (tabla A.5), con este diámetro se calcula el área interna de la sección transversal de la tubería.

3.4.4.6. Cálculo del Área Interna

Habiendo seleccionado el diámetro interno de la tubería, se calcula el área interna de la sección transversal de la tubería de la siguiente ecuación:

$$A_i = 0,25 \times \pi \times \left(5,0470 \text{ pulg} \times \frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulg}} \right)^2 = 0,1389 \text{ pie}^2$$

3.4.4.7. Cálculo de la Velocidad de Flujo

La velocidad de flujo se calcula por la relación entre el caudal volumétrico y el área interna, calculados en los dos puntos anteriores.

$$V = \frac{0,9843 \text{ pie}^3/\text{s}}{0,1389 \text{ pie}^2} = 7,0854 \text{ pie}/\text{s}$$

3.4.4.8. Estimación de la Velocidad Crítica de Sedimentación

La correlación de velocidad crítica de sedimentación desarrollada por Durand es un parámetro que depende del diámetro interno seleccionado y del parámetro FL.

$$V_c = 1,1052 \sqrt{2 \times 32,2 \frac{\text{pie}}{\text{s}^2} \times \left(5,0470 \text{ pulg} \times \frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulg}}\right) \times \left(\frac{1,4494 - \frac{45,40}{62,4}}{\frac{45,40}{62,4}}\right)^{2,5}}$$

$$V_c = 5,6938 \text{ pie/s}$$

3.4.4.9. Relación V/Vc

La relación V/Vc es la segunda condición a cumplir en la línea y se calcula como sigue:

$$\frac{V}{V_c} = \frac{7,0854 \text{ pie/s}}{5,6938 \text{ pie/s}} = 1,24$$

De acuerdo a esto, comparando la velocidad de flujo (7,0854 pie/s) con la velocidad crítica de sedimentación calculada anteriormente (5,6938 pie/s), se puede ver que V es mayor que Vc y por otra parte, se cumple con la segunda condición en la cual $1,05 < V_p/V_c < 1,8$. Por lo tanto la selección de un diámetro de 5 pulg es aceptable para la línea de residuo de hidroconversión según la metodología de Fluor Daniel.

3.4.5. Muestra de Cálculo para Weir

3.4.5.1. Cálculo del Porcentaje de Sólidos en Volumen

Con el uso de la ecuación 3.4 se calcula el %Cv para poder obtener luego la densidad específica del sólido:

$$\%C_v = 0,0302$$

3.4.5.2. Cálculo de la Densidad Específica del Sólido

Con el uso de la ecuación 3.5 se calcula el SG_s :

$$SG_s = \frac{0,054 \times \frac{46,76}{62,4}}{0,0302} = 1,4494$$

3.4.5.3. Cálculo del Caudal Volumétrico de la Suspensión:

Para realizar el cálculo del diámetro requerido para la línea de manejo de suspensiones, es necesario expresar el caudal en unidades de volumen, tal como se muestra a continuación.

$$Q_v = \frac{165.687,57 \text{ lb/h}}{3.600 \text{ s}} \times \frac{1}{46,76 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}} = 0,9843 \text{ pie}^3/\text{s}$$

El programa según Weir permite realizar el cálculo del caudal volumétrico mínimo y máximo de la siguiente forma:

$$Q_{v\min} = \frac{\left(\frac{165.687,57 \text{ lb/h}}{1,25}\right)}{3.600 \text{ s}} \times \frac{1}{46,76 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}} = 0,7874 \text{ pie}^3/\text{s}$$

$$Q_{v\max} = \frac{\left(165.687,57 \frac{\text{lb}}{\text{h}} \times 1,25\right)}{3.600 \text{ s}} \times \frac{1}{46,76 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}} = 1,2303 \text{ pie}^3/\text{s}$$

3.4.5.4. Estimación del Parámetro FL

Para la estimación del parámetro de limitación de velocidad de sedimentación (por Weir), se utiliza la ecuación 3.17.

$$FL = 1,02 \times (1,39825612 \times (0,0302)^{0,04391121} + (0,18189282 + 0,0064241 \times \ln(0,0302)) \times \ln(0,424 \text{ mm}))$$

$$FL = 1,0835$$

Con FL calculado se procede a calcular el diámetro requerido para cada uno de los caudales (nominal, mínimo y máximo).

3.4.5.5. Cálculo del Diámetro Requerido

Con la ecuación 3.18 se calcula el diámetro nominal, mínimo y máximo, con el uso de sus respectivos caudales volumétricos. Para estimar diámetro nominal requerido se utiliza el Q_v de $0,9843 \text{ pie}^3/\text{s}$ ($0,0279 \text{ m}^3/\text{s}$) obtenido en el punto 3.4.5.3 y utilizando el parámetro de limitación de la velocidad crítica de sedimentación obtenido anteriormente ($FL=1,0835$).

$$D_{req} = \left(\frac{4 \times 0,0279 \text{ m}^3/\text{s}}{3,600} \right)^{2/3} = 0,1407 \text{ m}$$

$$D_{req} = 0,1407 \text{ m} \times \frac{1 \text{ in}}{0,0254 \text{ m}} = 5,5389 \text{ pulg}$$

El diámetro requerido mínimo es de 5,0659 pulg y el máximo de 6,0560 pulg; en este paso se aproximan los diámetros obtenidos para obtener un valor entero (5",6" y 6" para los diámetros mínimo, nominal y máximo, respectivamente). En este caso el diámetro nominal es igual al diámetro máximo, debido a la aproximación realizada anteriormente. Por otra parte, con la tabla A.5, se obtiene el diámetro interno, siendo de 6,0650 pulg para el diámetro nominal,

5,0470 pulg para el diámetro mínimo y 6.0650 pulg para el diámetro máximo. Con este valor de diámetro interno obtenido se calcula la velocidad de flujo.

3.4.5.6. Cálculo del Área Interna

El cálculo del área interna para el diámetro nominal se calcula de la siguiente forma:

$$A_i = 0,25 \times \pi \times \left(5,5389 \text{ pulg} \times \frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulg}} \right)^2 = 0,2006 \text{ pie}^2$$

Por otra parte, el área interna para el diámetro mínimo y máximo es de 0,1389 pie² y 0,2006 pie², respectivamente.

3.4.5.7. Cálculo de la Velocidad de Flujo

La velocidad de flujo calculada por la relación entre el caudal volumétrico y el área interna, resulta en:

$$V = \frac{0,9843 \text{ pie}^3/\text{s}}{0,2006 \text{ pie}^2} = 4,9065 \text{ pie}/\text{s}$$

La velocidad mínima obtenida es de 5,6684 pie/s y la velocidad máxima es de 6,1331 pie/s.

3.4.5.8. Estimación de la Velocidad Crítica de Sedimentación

La correlación de velocidad crítica de sedimentación desarrollada por Durand es un parámetro que depende del diámetro interno seleccionado y del parámetro FL. La velocidad crítica de sedimentación para el diámetro nominal se calcula de la siguiente forma:

$$V_c = 1,1052 \sqrt{2 \times 32,2 \frac{\text{pie}}{\text{s}^2} \times \left(5,0659 \text{ pulg} \times \frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulg}}\right) \times \left(\frac{1,4494 - \frac{45,40}{62,4}}{\frac{45,40}{62,4}}\right)^{2,5}}$$

$$V_c = 6,1195 \text{ pie/s}$$

Del mismo modo se calculan las velocidades críticas mínimas y máximas utilizando el diámetro adecuado. La velocidad mínima es de 5,5824pie/s y la máxima 6,1195pie/s. Cada una de estas velocidades son comparadas con la velocidad de flujo de acuerdo al diámetro utilizado.

3.4.5.9. Relación V/Vc

La relación V/Vc es la segunda condición a cumplir en la línea y se calcula como sigue:

Nominal:

$$\frac{V}{V_c} = \frac{4,9065 \text{ pie/s}}{6,1195 \text{ pie/s}} = 0,8018$$

El diámetro nominal de 6 pulg no cumple con la condición de $V > V_c$ ($0,8018 < 1,05$), por lo tanto tampoco puede cumplir con la relación V/Vc; lo que indica que la selección de un diámetro de 6 pulg es inadecuado para la línea.

Mínimo:

$$\frac{V}{V_c} = \frac{5,6684 \text{ pie/s}}{5,5824 \text{ pie/s}} = 1,0154$$

El diámetro mínimo de 5 pulg, pero a menor caudal másico que el nominal, cumple con la condición de $V > V_c$ ($5,6684 \text{ pie/s} > 5,5824 \text{ pie/s}$), pero no con la

relación V/V_c ($1,05 < 1,0154 < 1,8$); lo que indica que el diámetro seleccionado de 5 pulg no es adecuado para la línea en este caso.

Máximo:

$$\frac{V}{V_c} = \frac{6,1331 \text{ pie/s}}{6,1195 \text{ pie/s}} = 1,0022$$

El diámetro máximo de 6 pulg, pero a mayor caudal másico que el nominal, cumple con la condición de $V > V_c$ y pero no cumple con la relación V/V_c , ello indica que la selección de un diámetro de 6 pulg no es adecuado para la línea en este caso.

3.4.6. Cálculo de la Desviación de los Programas

De acuerdo a la teoría la correlaciones para el cálculo de la velocidad crítica de sedimentación tienen un 25% de desviación, por lo tanto, se compararon los diámetros entregados por JGC y los diámetros de tubería obtenidos para obtener la desviación de los programas en conjunto (Se calculó para Weir y Fluor Daniel debido a que estas metodologías son las que reproducen los diámetros hallados en los DTI's estudiados).

Tabla 5. Comparación de diámetros entre los diámetros obtenidos con las metodologías utilizadas y los diámetros entregados por JGC

Servicio	JGC (pie)	Obtenido (pie)
Residuo de hidroconversión	5	5
Fondo de vacío	20	8
Fondo de vacío desde G-7921A/B	12	8

Reciclo caliente a la torre de vacío	12	8
Reciclo frío a la torre de vacío	12	8
Fondo de vacío a la formación de hojuelas	4	4

Con los datos de la tabla 3.5 se calcula la desviación de los programas:

$$\%Desviación_{\text{Fondo de vacío}} = \left| \frac{20 - 8}{20} \right| * 100 = 60\%$$

Realizando el mismo cálculo para las otras líneas y sacando un promedio, obtenemos la desviación global:

$$\%Desviación_{\text{Global}} = \frac{0 + 60 + 33,33 + 33,33 + 33,33 + 33,33 + 0}{6} = 32,22\%$$

3.5. Estructuración de un Programa para la Verificación de Líneas de Manejo de Suspensiones del Proyecto CP-RPLC

La elaboración de un programa que permita verificar las líneas de manejo de suspensiones surge de la necesidad de proporcionar una herramienta automatizada que simplifique los cálculos, debido a que las correlaciones para determinar las velocidades críticas de sedimentación y las caídas de presión implican cálculos extensos.

El programa fue desarrollado en Microsoft Excel, mediante la implementación de las herramientas que éste dispone para la generación de hojas de datos. Cada programa está integrado básicamente por una hoja de entrada de datos en el que hay que introducir: tasa de flujo, viscosidad de la suspensión, gravedad específica del líquido, gravedad específica del sólido y porcentaje en peso de sólidos, entre otros.

Cualquier usuario puede utilizar el programa, siempre y cuando tenga bien establecidas las bases y los criterios de funcionamiento de las líneas que manejan

suspensiones, sus características, y cuenta con los conocimientos necesarios para realizar la selección más adecuada de las propiedades de flujo a utilizar. Así mismo, el usuario debe manejar el computador bajo el ambiente Windows y tener un conocimiento básico del manejo de Excel y de sus propiedades, para interpretar los procedimientos de cálculo cuyas instrucciones se localizan en las celdas.

El programa en su totalidad consta de 11 hojas, de las cuales 7 son hojas de cálculo, 2 son para la presentación del programa y 2 para las propiedades del flujo y diámetro. El programa puede calcular la velocidad crítica de acuerdo al diámetro a estudiar en las líneas que manejan suspensiones, según la metodología desarrollada por las compañías Foster Wheeler, Flygt, Fluor Daniel y Weir.

Entre las características que ofrece el programa se encuentran:

- Opciones de ayuda con el fin de facilitar la introducción de los datos y guiar al usuario en la selección, manejo y consideraciones de cada uno de los programas.
- Comentarios que permiten la búsqueda e interpretación de los datos y resultados.
- Hipervínculos con las otras hojas del documento para facilitar el manejo.
- Facilidad de modificaciones y/o ampliaciones futuras (por el autor).
- Versatilidad y fácil manejo.
- Hoja de datos donde se muestran las propiedades del fluido según la unidad de estudio.
- Sistemas automatizados de alerta ante cualquier peligro de sedimentación en las tuberías de manejo de suspensiones.

3.5.1. Estructura del Programa

- ✓ Menú. Página principal

En la figura 3.2 se muestra una hoja de presentación del programa



Figura 15. Menú y página principal.

✓ Propiedades del fluido

En la hoja de la figura 3.3 se pueden ver las propiedades de las unidades de hidroconversión *HDHPLUS* y *Residue Work-up*, 76 y 79 respectivamente.

Propiedades del flujo	
Unidad 76, SLURRY TO G-7621	
Nombre de la línea	7
Descripción de la línea	SLURRY TO G-7621
Flujo másico (Lb/h)	389119.80
Flujo molar (Lbmol/h)	661.15
Temperatura (°F)	567.04
Presión (psig)	58.02
Densidad (Lb/ft ³)	55.08
Fase vapor	
Flujo molar (Lbmol/h)	-
Flujo másico (Lb/h)	-
Densidad (Lb/ft ³)	-
Viscosidad (cP)	-
Fase líquida	
Flujo molar (Lbmol/h)	659.98
Flujo másico (Lb/h)	383283.00
Densidad (Lb/ft ³)	54.75
Densidad Std (Lb/ft ³)	66.13
Viscosidad del	10.40
Viscosidad del Slurry	10.68
Fase sólida	
Flujo molar (Lbmol/h)	1.17
Flujo másico (Lb/h)	5836.80

Figura 16. Propiedades del fluido

La siguiente hoja (figura 3.4) ofrece instrucciones al usuario de cómo utilizar el programa de forma general y simplificada. También especifica cómo se debe utilizar cada programa en particular, o consideraciones que el usuario debe tomar en cuenta antes de introducir los datos solicitados.



CP-RPLC
Conversión Profunda
Refinería Puerto la Cruz



Tutorial

Menú de inicio

1. General:

- 1.1- Seleccione el programa a utilizar para la verificación de las líneas de manejo de suspensiones (slurry).
- 1.2- El usuario deberá llenar "sólo" los espacios en blanco del programa a utilizar.
- 1.3- Se deben introducir los datos en las unidades expuestas al lado de las celdas en blanco.
- 1.4- Las celdas de color " " serán utilizadas por el programa para realizar los cálculos.
- 1.5- El programa arrojará respuestas a las que el usuario deberá estar alerta para corregir valores críticos.
- 1.6- Al lado derecho de los programas encontrará las propiedades del diámetro a utilizar.
- 1.7- Es posible volver al "Menú de inicio" y al "Tutorial" con los botones en la parte superior derecha de cada programa.

Menú de inicio

2. Propiedades:

- 2.1- El usuario podrá ver las propiedades de las unidades 76 y 79 HDHPLUS y Residue Work-up seleccionandolas previamente en la pestaña indicada. (Propiedades del proyecto CP-RPLC)



3. Programa según Weir:

- 3.1- Introduzca la información solicitada en las celdas en blanco.
- 3.2- Seleccione en las pestañas desplegables los diámetros mínimo, nominal y máximo indicados
- 3.3- Verifique que V/Vc se adecuado, de no ser así, modifique el diámetro o el caudal másico
- 3.4- Seleccione el número y tipo de accesorios que posee la línea de ser necesario (mejor definición del sistema).
- 3.5- Corrija los datos introducidos en caso de ser necesario de acuerdo a la respuesta obtenida por el programa.
- 3.6- Al hacer click al boton "Accesorios" prodrá ver un gráfico con las longitudes equivalentes de cada tipo.



4. Programa según Flygt:

- 4.1- Introduzca la información solicitada en las celdas en blanco.
- 4.2- Seleccione el diámetro a estudiar en la pestaña desplegable indicada
- 4.3- El usuario deberá colocar el valor de la velocidad crítica por la intersección entre el diámetro y el tamaño de sólidos
- 4.4- Haga click en el boton "Curva de corrección" y lea un valor de corrección, entrando con SGs
- 4.5- Haga click en el boton "Gráfico de Hf" para leer la pérdida por fricción de acuerdo a Qv y D
- 4.5- Corrija los datos introducidos en caso de ser necesario de acuerdo a la respuesta obtenida por el programa.



5. Programa según Fluor Daniel:

- 5.1- Introduzca la información solicitada en las celdas en blanco.
- 5.2- Seleccione el diámetro a utilizar.
- 5.3- Corrija los datos introducidos en caso de ser necesario de acuerdo a la respuesta obtenida por el programa.



6. Programa según Foster Wheller:

- 6.1- Introduzca la información solicitada en las celdas en blanco.
- 6.2- Suponga una velocidad de estudio para verificar que esta puede ser utilizada.
- 6.3- Seleccione el diámetro requerido de acuerdo a la respuesta obtenida por el programa o varíelo de acuerdo a su conveniencia.
- 6.4- Corrija los datos introducidos en caso de ser necesario de acuerdo a la respuesta obtenida por el programa.



Figura 17. Tutorial del programa

✓ Programa según Flygt

Esta hoja de cálculo (figura 3.5) está basada en la compañía de origen sueco Flygt, líder mundial en bombas sumergibles, mezcladores y sistemas de aireación. El programa es capaz de calcular una velocidad que es comparada con la velocidad crítica de la línea; se deben introducir datos de concentración de sólidos en volumen, densidad del sólido, tasas de flujo, diámetro de tubería, longitud de tubería y tamaño de sólidos.

CP-RPLC

Coverción Profunda Refinería Puerto La Cruz

Calculo No. _____
Fecha _____

Unidad: _____ Proyecto No. _____
Nombre de la Unidad: _____ Chk por: _____ Appr por: _____
Caso: _____

Verificación de Líneas

Entrada de datos

Temperatura: _____ °F
Caudal másico: 382601,30 lb/hr
%En peso del sólido: 18,32 %wt
Densidad del líquido: 61,81 Lb/ft³
Densidad del slurry: 65,61 Lb/ft³
Tamaño de partículas: 424,00 Micrones

Verifique las propiedades usadas de ser necesario

Propiedades del fluido

Respuestas obtenidas:
Utilice la curva de corrección para corregir la velocidad crítica leída
V/Vc Inadecuado
La selección de un diámetro de 12in podría provocar problemas de sedimentación en la línea

Cálculos base

SG_s: 0,9305
SG_l: 1,4485
SG_m: 1,0514
Conc. Sólidos en vol: 0,1330 %
Caudal volumétrico: 1,6198 ft³/s

Diámetro

Diámetro a utilizar: 12 in
Diámetro interno: 12,0000 in

Mostrar propiedades del diámetro seleccionado

Velocidad Crítica (Vc) (Para tamaño de sólidos y SG=3)

Diámetro de tubería	Mesh 65									
	in	mm	µm	200	300	500	700	1000	2000	>5000
1	25	4,27	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59
2	50	4,27	5,58	5,91	5,91	5,91	5,91	5,91	5,91	5,91
3	75	5,25	5,91	6,23	6,23	6,23	6,23	6,23	6,23	6,23
4	100	5,58	6,23	6,56	6,56	6,56	6,56	6,56	6,56	6,56
6	150	5,58	6,56	6,89	6,89	6,89	6,89	6,89	6,89	6,89
8	200	5,91	6,56	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51	7,51
12	300	5,91	6,89	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87	7,87
16	400	5,91	6,89	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2

Curva de corrección Utilice la curva de corrección para corregir la velocidad crítica leída

Velocidades

Velocidad Crítica de sedimentación leída: 7,5 ft/s
Velocidad de flujo: 2,0627 ft/s
Velocidad de transporte: 3,0627 ft/s
Velocidad Crítica de sedimentación corregida: 3,7500 ft/s

V/Vc Inadecuado
Utilice la selección del diámetro, podrían existir problemas de sedimentación en la línea

Cálculo de la descarga Total

Longitud de la tubería: _____ ft

Con Q igual a 46ft³/s y D igual a 310mm lea del gráfico (Perdidas por fricción m/1000 m de longitud de tubería vs agua limpia)

Gráfico de Hf Pérdida por fricción por 1000m de tubería leída: _____ m/1000m de tubería
ft/3280,84ft de tubería

Para una tubería de ft la pérdida es igual a: _____ ft

Figura 18. Programa según Flygt

✓ Programa según Fluor Daniel

Fluor Daniel realizó estudios a las líneas de manejo de suspensiones del proyecto de Conversión Profunda. La hoja de cálculo desarrollada determina la velocidad de transporte con las siguientes especificaciones: densidades del sólido y del líquido, y el porcentaje en peso del sólido (figura 3.6).

Además, la mayoría de las correlaciones que utiliza están basadas en el uso de agua como el medio líquido e incluso se han simplificado las correlaciones utilizando la densidad y la viscosidad del agua. El uso de estas correlaciones sin verificación no se considera prudente. Con el fin de tratar esta situación, Fluor Daniel ha utilizado varias de estas correlaciones y al mismo tiempo ha desarrollado un consenso para obtener un estimado de la velocidad mínima para prevenir la sedimentación.

CP-RPLC
 Conversión Profunda Refinería Puerto La Cruz

Calculo No: _____
 Fecha: _____

Unidad: _____ Proyecto No: _____
 Nombre de la Unidad: _____ Chk por: _____ Appr por: _____
 Caso: _____

Verificación de Líneas

Entrada de datos

Temperatura:		*F
Caudal másico:	118738,93	Lb/h
%En peso del sólido:	8,66	%wt
Densidad del líquido:	43,62	Lb/ft ³
Densidad del slurry:	45,67	Lb/ft ³
Tamaño de partículas:	424,00	Micrones
Viscosidad del slurry:	0,58	cP

Verifique las propiedades usadas de ser necesario [Menú de inicio](#)

Propiedades del fluido

Respuestas obtenidas
El diámetro a estudiar ocasiona problemas de sedimentación en la línea V/Vc Inadecuado

Mostrar propiedades del diámetro relacionado

Cálculos base

SG _s :	0,6990
SG _l :	1,4513
SG _m :	0,7319
Conc. Sólidos en vol:	0,0437 %
Caudal volumétrico:	0,7222 ft ³ /s
Parámetro FL:	1,1142

Diámetro

Diámetro a utilizar: 10 in
 Diámetro interno: 10,0200 in

Velocidades

Área interna:	0,5476	ft ²
Velocidad de flujo:	1,3190	ft/s
Velocidad de transporte:	2,3190	ft/s
Velocidad Crítica de sedimentación:	8,4741	ft/s
Razon de velocidad (V/Vc):	0,16	

Figura 19. Programa según Fluor Daniel

✓ Programa según Weir

La siguiente hoja de cálculo fue desarrollada mediante las correlaciones de la división de suspensiones Weir, proveniente de la compañía australiana Warman. El programa según Weir toma en cuenta los accesorios, además de los datos utilizados en los programas anteriores (figura 3.7).

CP-RPLC
 Conversión Profunda Refinería Puerto La Cruz

Calculo No. _____
 Fecha _____

Unidad: _____ Proyecto No. _____
 Nombre de la Unidad: _____ Chk por: _____ Appr por: _____
 Caso: _____

Verificación de Líneas

Entrada de datos

Temperatura:		*F
Caudal másico:	382601,30	Lb/h
%En peso del sólido:	18,32	%wt
Densidad del líquido:	61,81	Lb/ft³
Densidad del slurry:	65,61	Lb/ft³
Tamaño de partículas:	424,00	Micrones

Verifique las propiedades usadas de ser necesario **Propiedades del fluido** **Menú de inicio**

Respuestas obtenidas:
 Use diámetros de 7in, 8in y 8in para los diámetros mínimo, nominal y máximo respectivamente
 Diámetro mínimo inadecuado Diámetro mínimo inadecuado Diámetro mínimo inadecuado

Cálculos base

SG ₁ :	0,9905
SG ₂ :	1,4485
SG ₃ :	1,0514
Conc. Sólidos en vol:	0,1330 %
Parámetro FL:	1,1575

Diámetro

	Mínimo	Nominal	Máximo	
Caudal másico:	306081,04	382601,30	478251,63	Lb/h
Caudal volumétrico:	1,2959	1,6198	2,0248	ft³/s
Diámetro:	7,0156	7,6706	8,3868	in
Diámetro a utilizar:	4	6	8	in
Diámetro interno:	4,0260	6,0650	5,0470	in

Use D igual a 7 Use D igual a 8 Use D igual a 8in

Ver propiedades del diámetro 16 in

Tamaño nominal de tub., in	Diám. exterior, in	No. de cédula	Diám. interior, in
		5S	15,67
		10S	15,624
16	16	20	15,5
		30, ST	15,25
		40, XS	15
		60	14,688
		80	14,312
		100	13,938
		120	13,562
		140	13,124
		160	12,812

Velocidades

	Mínimo	Nominal	Máximo	
Área interna:	0,0884	0,2006	0,1389	ft²
Velocidad de flujo:	14,6601	8,0748	14,5760	ft/s
Velocidad de transporte:	15,6601	9,0748	15,5760	ft/s
Velocidad Crítica de sedimentación:	3,6573	4,4888	4,0948	ft/s
Razón de velocidad (V/Vc):	4,2819	2,0216	3,8038	

V/Vc Inadecuado/V/Vc Inadecuado/V/Vc Inadecuado

Perdidas de carga por fricción

Diámetro a utilizar: 6 in
 Longitud de la tubería: 328,08 ft

Seleccione la velocidad según el diámetro a usar

Mostrar Factor de Fricción (f)

Selección de accesorios

Radius More Than 3 x NB	Radius 1.5 2 x NB	Elbow	Tee	Rubber Hose	Diaphragm Valve Full Open	Full Bore Valve Round Way	Plug-Loob Valve Rect. Way	4" Inch. Tee Full Type
5	8	6	4	2	-	-	-	-

Ver Seq de accesorios

Longitud equivalente por accesorios y válvulas: 410,3675 ft
 Longitud equivalente actual: 738,4515 ft
 Perdidas por fricción:

15,66 Min
 9,07 Nom
 15,58 Max

Seleccione sólo una velocidad

El diámetro o velocidad nominal provocan sedimentación

Fig.ura 20. Programa según Weir

✓ Programa según Foster Wheeler

La compañía Foster Wheeler basó su metodología de trabajo utilizando las correlaciones de Durand. El programa (figura 3.8) es alimentado con los valores de tasa de flujo, viscosidad de la suspensión, gravedad específica del sólido y del líquido, y porcentaje en peso del sólido. Adicionalmente, con el uso de la figura B.3 se conoce el régimen de flujo al cual se trabaja.

CP-RPLC

Calculo No.
 Fecha

Coversión Profunda Refinería Puerto La Cruz

Unidad: Proyecto No.

Nombre de la Unidad: Chk por: Appr por:

Caso:

Verificación de Líneas

Entrada de datos

Temperatura:	760,00	°F
Caudal másico:	118738,93	lb/hr
%En peso del sólido:	8,66	%wt
Densidad del líquido:	43,62	Lb/ft ³
Densidad del slurry:	45,67	Lb/ft ³
Tamaño de partículas:	424,00	Micrones
Viscosidad del slurry:	0,58	cp

Verifique las propiedades usadas de ser necesario

Propiedades del fluido

Menú de inicio

Respuestas obtenidas

Seleccione un diámetro de 5in

La selección de diámetro y velocidad supuesta es aceptable

Cálculos base

SG _s :	0,6990
SG _l :	1,4513
SG _{sl} :	0,7319
Volumen de sólido:	0,0956 ft ³
Volumen de líquido:	2,0940 ft ³
Conc. Sólidos en vol:	0,0437 %
Caudal volumétrico:	0,7222 ft ³ /s

Mostrar propiedades del diámetro seleccionado

Tamaño nominal de tub., in	Diám. exterior, in	No. de cédula	Diám. interior, in
		5S	4,334
		10S	4,26
4	4,5	40ST,40S	4,026
		80XS,80S	3,826
		120	3,624
		160	3,438
		XX	3,152

Diámetro

Velocidad supuesta es: ft/s

Diámetro requerido: ft

Seleccione un diámetro de 5in

Diámetro a utilizar: in

Diámetro interno: in

Velocidad del fluido: ft/s

Velocidad de transporte: ft/s

Velocidades

Velocidad Crítica de sedimentación:	0,3653	ft/s
Velocidad de salto de partícula:	6,0297	ft/s
Velocidad de suspensión de la partícula:	6,2094	ft/s
Velocidad de homogenización:	21,5704	ft/s

Diámetro y la velocidad del fluido es acepta

Figura 21. Programa según Foster Wheeler

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Análisis de los Problemas Asociados al Régimen de Flujo en las Líneas de Transporte de Fluidos Bifásicos con Suspensiones

Se estudiaron los problemas asociados al manejo de suspensiones a través de tuberías, los cuales llevan consigo problemas especiales que deben ser solventados para evitar inconvenientes en las líneas.

El principal problema encontrado se presenta con la velocidad crítica de sedimentación que determina el dimensionamiento adecuado de una línea; a pesar de su importancia, no existen estudios satisfactorios para su predicción, limitándose la literatura revisada, únicamente a dar valores fijos puntuales o ecuaciones que no incluyen todos los parámetros que intervienen en el transporte hidráulico de sólidos.

La velocidad crítica no solamente depende de las características del fluido y de los sólidos suspendidos, sino también depende de las características de la sección de tubería y de la concentración volumétrica de las partículas sólidas; este último parámetro no se toma en cuenta en las ecuaciones recomendadas por las normas de diseño para manejo de suspensiones.

Por otra parte, las líneas de manejo de suspensiones del proyecto de Conversión Profunda, según sus propiedades, trabajan en un régimen pseudo-homogéneo con tamaños de partículas de 282 micrones a 850 micrones y porcentajes de sólidos en peso de 5,84% a 35,33%, para conversiones de 85% y

92%. Con estos parámetros también se puede predecir el comportamiento de las pérdidas por fricción que serían de categoría “C” para la conversión a 85% y como categoría “D” para la conversión de 92% según las zonas establecidas en la figura 2.13, debido a que los porcentajes de sólidos en peso alcanzan casi el 36%. Este parámetro de pérdidas por fricción en una tubería de manejo de suspensiones depende de la rugosidad de la tubería, del factor de fricción y de la velocidad crítica. Como se dijo anteriormente en el capítulo 3, no se contó con datos exactos de diámetros de partícula, longitudes de líneas o inclinaciones de las mismas; debido a que no existen los planos isométricos actualmente; por lo que el cálculo de las pérdidas por fricción resultaría en un valor ilógico ya que conllevaría a muchos errores arrastrados desde el cálculo de la velocidad crítica de sedimentación. Por esta razón se desestimó la realización de dicho cálculo.

Las líneas de manejo de suspensiones estudiadas fueron el residuo de hidroconversión, el fondo de vacío, el fondo de vacío de la bomba G-7921A/B, el reciclo caliente a la torre de vacío, el reciclo frío a la torre de vacío y el fondo de vacío que se dirige a la unidad 81. Estas seis líneas cumplen con las especificaciones de la teoría en cuanto a válvulas y accesorios.

A continuación se muestra en la figura 4.1 las líneas de manejo de suspensiones de la unidad 79, en donde se observa en color rojo la línea donde se encontró problemas con los accesorios (línea de reciclo caliente a la torre de vacío).

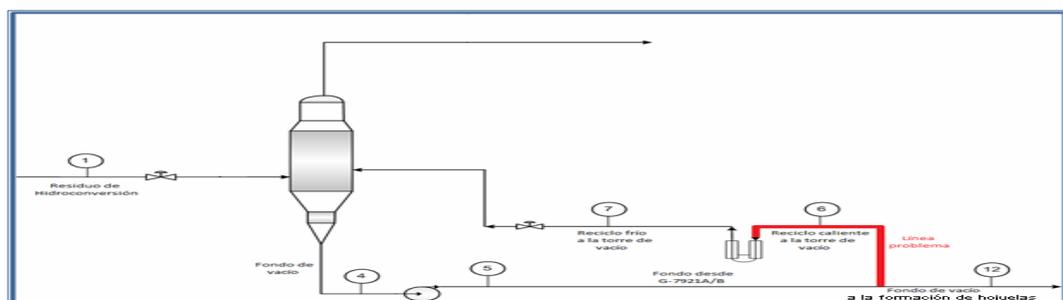


Figura 22. Representación de las líneas estudiadas señalando la línea problema de la unidad 79.

Sólo se encontró problemas en la línea de reciclo caliente a la torre de vacío (figura 4.1), en donde se encuentra un medidor de placa orificio, cuando para líneas de suspensiones se recomiendan tubos venturi que permiten que los sólidos puedan ser arrastrados a través de él con mayor facilidad, reduciendo así la caída de presión en la línea. Con un medidor de placa orificio existe el riesgo de que cuando la línea se encuentre en espera, los sólidos puedan sedimentarse y se haga más difícil el lavado con solventes, por lo cual se debería considerar lavado con varillas para promover la remoción una posible sedimentación.

Las líneas cumplen con los parámetros teóricos para los codos, las cuales deben ser de cinco veces el diámetro. Las líneas están dispuestas con codos de radio largo, adecuados para este tipo de situaciones. No se encontraron puntos muertos en los DTI'S estudiados.

4.2. Ecuaciones Aplicables al Transporte de Fluidos Bifásicos (Líquido-Sólido) que se Ajusten a los Rangos Requeridos por PDVSA

Después de haber conocido los problemas asociados al régimen de flujo, se buscaron ecuaciones aplicables a rangos de viscosidades desde 1 a 500 cP, temperaturas desde 70 hasta 1.000 °F, y presiones desde 14 hasta 3.000 psig. Así mismo, las ecuaciones debían abarcar un rango de partículas sólidas de coque, con tamaño de 282 a 850 micrones y concentraciones de 0,5 hasta 43 % en peso de sólidos, a través de ductos circulares comprendidos entre 2 y 30 pulgadas de diámetro nominal; estas ecuaciones abarcan la sedimentación y la no sedimentación de las suspensiones.

Las ecuaciones fueron obtenidas de muestras de cálculo desarrolladas por cuatro empresas asociadas al estudio de bombas y líneas de manejo de suspensiones, las cuales fueron Weir (proveniente de Warman), Foster Wheeler, Flygt y Fluor Daniel. Esta última, en 1996, realizó un estudio de las líneas del proyecto de Conversión Profunda y recomendó el uso de la ecuación desarrollada

por Durand para el cálculo de la velocidad crítica de sedimentación. Se encontró que estas correlaciones no son del todo seguras, ya que poseen desviaciones de aproximadamente un 25%. Por otra parte, se debe tener especial cuidado con la concentración de sólidos, ya que de ésta depende en gran parte como se pueda comportar la suspensión; por ejemplo, al aumentar las diferencias de densidades específicas entre el sólido y el líquido, los sólidos tienden a sedimentarse con mayor facilidad en las líneas.

Las ecuaciones utilizadas son apropiadas para el cálculo de la velocidad crítica, ya que cumplen con los requerimientos de diámetro de tubería, diámetro de partícula y porcentaje de sólidos en peso; sin embargo se debe tener a disposición los parámetros indicados por estas ecuaciones para que sean adecuadamente aplicadas a la línea a estudiar.

4.3. Establecimiento de las Velocidades Críticas de Sedimentación de las Partículas Sólidas

Se establecieron las velocidades críticas de sedimentación para las seis líneas estudiadas por medio de una hoja de cálculo desarrollada en Microsoft Excel 2007, de acuerdo con las propiedades de cada una de ellas. Uno de los factores importantes en este paso fue suponer un diámetro de partícula de 424 micrones, el cual es un promedio del diámetro de partículas utilizado en el diseño; este parámetro afecta directamente al parámetro de limitación de velocidad de sedimentación (FL), y a su vez a la velocidad de sedimentación.

Para el establecimiento de la velocidad con el programa para Foster Wheeler, al no tener una velocidad real de estudio se consideró un criterio de velocidades tomado de la empresa Weir, en la cual las velocidades críticas de sedimentación para un régimen pseudo-homogéneo, debe estar en un rango de 2 a 10 pie/s. Debido a esta ausencia de datos, para evaluar el programa de Foster Wheeler se tomó la velocidad supuesta como un número entero de la velocidad

crítica de sedimentación obtenida por el programa de Weir cuando se cumplía con el criterio de $V > V_c$ y el rango $1,05 < V < 1,8$. A continuación se muestran los resultados del establecimiento de la velocidad crítica de sedimentación para cada línea de manejo de suspensiones, de acuerdo a cada programa.

El estudio se realizó en base a la conversión de 85% obtenida en la unidad 76 (Hidroconversión), debido a que a esta conversión se alcanza el valor más crítico de caudal másico de la suspensión, del cual depende la estimación del diámetro de tubería requerido para el transporte de suspensiones. Por otra parte, las condiciones para la conversión de 92% se muestran en las tablas del anexo A.

La tabla 4.1 muestra los datos introducidos para la conversión de 85% para cada una de las líneas estudiadas; en el anexo A, se muestran los datos introducidos para la conversión de 92%.

La tabla 4.2 muestra el establecimiento de las velocidades críticas de sedimentación para la conversión de 85% (ver anexo A para el caso de 92% de conversión). Para la línea de residuo de hidroconversión el diámetro requerido fue de 6", pero se realizó el establecimiento de V_c para el diámetro inmediato superior y el diámetro inmediato inferior, para evaluar la tolerancia de la línea; esto se repitió para cada una de las líneas estudiadas.

Tabla 6. Valores variables introducidas en los programas para una conversión del 85%.

Datos introducidos	Residuo de hidroconversión	Fondo de vacío	Fondo de vacío desde G-7921A/B	Reciclo caliente a la torre de vacío	Reciclo frío a la torre de vacío	Fondo de vacío a la formación de hojuelas
Caudal másico de la suspensión (lb/h)	165.687,57	382.601,3	383.665,83	330.690	330.690	52.975,33
%Peso del sólido	5,84	18,32	18,32	18,32	18,32	18,27
Tamaño de la partícula (micrones)	424	424	424	424	424	424
Diámetro (pulg)	5	20	12	12	12	4

Tabla 7. Estimación de la velocidad crítica de sedimentación para la línea de residuo de hidroconversión.

	Weir	Flygt	Fluor Daniel	Foster Wheeler
Diámetro evaluado (pulg)	5			
Velocidad de flujo (pie/s)	7,09	7,09	7,09	7,08
Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	5,58	3,25	5,69	6,58
Razón de velocidad (V/Vc)	1,27	2,18	1,24	1,08
Diámetro evaluado (pulg)	6			
Velocidad de flujo (pie/s)	4,91	4,91	4,91	4,91
Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	6,12	3,37	6,24	7,21
Razón de velocidad (V/Vc)	0,80	1,46	0,79	0,68
	Weir	Flygt	Fluor Daniel	Foster Wheeler
Diámetro evaluado (pulg)	8			
Velocidad de flujo (pie/s)	2,83	2,83	2,83	2,83
Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	7,02	3,52	7,16	8,28
Razón de velocidad (V/Vc)	0,40	0,80	0,40	0,34

La metodología propuesta por Flygt y Foster Wheeler dependen del efecto del diámetro de partícula sobre la velocidad crítica de sedimentación, ya que al no ser variado genera errores en los cálculos o no permite diferenciar el efecto que tiene V_c sobre la velocidad de flujo y el diámetro. El programa según Flygt se puede mejorar si se generan las tablas correspondientes al diámetro de partícula utilizado en una situación particular, para las líneas de manejo de suspensiones (tabla 3.3).

Las ecuaciones utilizadas por Weir y Fluor Daniel se ven afectadas de igual forma al calcular el parámetro FL (que depende del tamaño de partícula y de la concentración de sólidos en peso); este no varía si no se modifica el tamaño de partículas o $\%C_w$, por lo tanto disminuye la exactitud de la velocidad crítica establecida. Por otra parte, la velocidad de flujo que se determinó con la relación entre el caudal volumétrico y el área de la sección transversal de la tubería, varía por el cambio de diámetro. Esta velocidad debe ser mayor que la velocidad crítica de sedimentación y cumplir con la sugerencias que establece la teoría, $V > V_c$ y que la relación V/V_c se encuentre entre 1,05 y 1,8; de este modo se podría decir que el diámetro estudiado es adecuado.

Los resultados obtenidos ejecutando las distintas metodologías en una hoja de cálculo, indican que el uso de un diámetro de 5'' sería adecuado para la línea de residuo de hidroconversión; no se recomienda el uso de un diámetro de 6'' o mayor a este. De especificarse una tubería de mayor diámetro entonces deberán considerarse cambios en los balances de materia para lograr velocidades más altas. El uso de velocidades altas mantendría los sólidos en suspensión y se evitaría la velocidad de salto; pero estos sólidos chocarían por impactos al azar contra la tubería, lo cual conllevaría a tener erosión y mayores pérdidas por fricción en las líneas. Por lo tanto, el uso de altas velocidades no es recomendable para este tipo de suspensiones sólido-líquido.

En la tabla 4.3, se muestra el establecimiento de las velocidades críticas de sedimentación, evaluándose para diámetros de tubería de 6'', 8'' y 10'', de los cuales las velocidades adecuadas se dan a un diámetro de 8'' donde se encuentra que la velocidad crítica de sedimentación es mayor que la velocidad de flujo y que las relaciones de V/V_c que cumplen con las recomendaciones de la literatura.

Tabla 8. Estimación de la velocidad crítica de sedimentación para la línea de fondo de vacío.

	Weir	Flygt	Fluor Daniel	Foster Wheeler
Diámetro evaluado (pulg)	6			
Velocidad de flujo (pie/s)	8,07	8,07	8,07	8,07
Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	2,52	3,37	2,54	4,59
Razón de velocidad (V/V_c)	3,21	2,40	3,17	1,76
Diámetro evaluado (pulg)	8			
Velocidad de flujo (pie/s)	4,66	4,66	4,66	4,66
Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	2,89	3,52	2,92	5,26
Razón de velocidad (V/V_c)	1,62	1,32	1,60	0,89
Diámetro evaluado (pulg)	10			
Velocidad de flujo (pie/s)	2,96	2,96	2,96	2,96
Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	3,23	3,73	3,27	5,90
Razón de velocidad (V/V_c)	0,91	0,79	0,90	0,50

En la tabla 4.4 se observa que las velocidades adecuadas se dan a un diámetro de 8''. Para un diámetro de 6'' se cumple con la condición de $V > V_c$, pero no cumple con la relación de V/V_c ; lo cual indica que no es recomendable su uso. Por otra parte el diámetro de 10'' no cumple con las condiciones requeridas, por lo tanto no es aconsejable utilizarlo.

Tabla 9. Estimación de la velocidad crítica de sedimentación para la línea de fondo de vacío desde la bomba G-7921A/B.

	Weir	Flygt	Fluor Daniel	Foster Wheeler
Diámetro evaluado (pulg)	6			
Velocidad de flujo (pie/s)	8,10	8,10	8,10	8,10
Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	2,51	3,37	2,53	4,58
Razón de velocidad (V/Vc)	3,23	2,41	3,20	1,77
Diámetro evaluado (pulg)	8			
Velocidad de flujo (pie/s)	4,68	4,68	4,68	4,68
Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	2,87	3,52	2,91	5,25
Razón de velocidad (V/Vc)	1,63	1,33	1,61	0,89
	Weir	Flygt	Fluor Daniel	Foster Wheeler
Diámetro evaluado (pulg)	10			
Velocidad de flujo (pie/s)	2,97	2,97	2,97	2,97
Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	3,22	3,73	3,26	5,89
Razón de velocidad (V/Vc)	0,92	0,80	0,91	0,50

En la tabla 4.5 se observan los resultados obtenidos de las estimaciones de las velocidades críticas de sedimentación, evaluándose para diámetros de tubería de 6'', 8'' y 10''. Las velocidades adecuadas se dan a 8'', ya que los diámetros de 6" y 10" poseen velocidades de flujo menores que la velocidad crítica de sedimentación.

Tabla 10. Estimación de la velocidad crítica de sedimentación para la línea de reciclo caliente a la torre de vacío.

	Weir	Flygt	Fluor Daniel	Foster Wheeler
Diámetro evaluado (pulg)	6			
Velocidad de flujo (pie/s)	6,98	6,98	6,98	6,98
Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	2,51	3,52	2,53	4,58
Razón de velocidad (V/Vc)	2,79	1,98	2,76	1,52
Diámetro evaluado (pulg)	8			
Velocidad de flujo (pie/s)	4,03	4,03	4,03	4,03
Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	2,87	3,52	2,91	5,25
Razón de velocidad (V/Vc)	1,40	1,15	1,39	0,77
Diámetro evaluado (pulg)	10			
Velocidad de flujo (pie/s)	2,56	2,56	2,56	2,56
Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	3,22	3,73	3,26	5,89
Razón de velocidad (V/Vc)	0,79	0,69	0,79	0,43

El establecimiento de la velocidad crítica de sedimentación mostrada en la tabla 4.6 para una tubería de 8", cumple con las condiciones recomendadas en la teoría, mientras que las líneas evaluadas a 6" y 10", no cumplen con estas condiciones; por lo cual, estos diámetros no son adecuados.

Tabla 11. Estimación de la velocidad crítica de sedimentación para la línea de reciclo frío a la torre de vacío

	Weir	Flygt	Fluor Daniel	Foster Wheeler
Diámetro evaluado (pulg)	6			
Velocidad de flujo (pie/s)	6,94	6,94	6,94	6,94
Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	2,46	3,37	2,49	4,55
Razón de velocidad (V/Vc)	2,82	2,06	2,79	1,53
Diámetro evaluado (pulg)	8			

Velocidad de flujo (pie/s)	4,01	4,01	4,01	4,01
Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	2,82	3,52	2,85	5,21
Razón de velocidad (V/Vc)	1,42	1,14	1,41	0,77
Diámetro evaluado (pulg)	10			
Velocidad de flujo (pie/s)	2,54	2,54	2,54	2,54
Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	3,16	3,73	3,19	5,84
Razón de velocidad (V/Vc)	0,81	0,68	0,80	0,44

En la tabla 4.7 se muestran las velocidades críticas de sedimentación, siendo adecuadas para diámetros de 3½” y 4”. A pesar de que en la tabla 4.7, para un diámetro de 3” la relación de V/Vc se cumple según las metodologías de Flygt y Foster Wheeler, a pesar de ello, estas velocidades críticas de sedimentación obtenidas no se consideraron debido a que la relación no se cumplió para las metodologías de Weir y Fluor Daniel, las cuales reprodujeron resultados similares a los estudiados en los DTI’S.

Tabla 12. Estimación de la velocidad crítica de sedimentación para la línea de fondo de vacío a la formación de hojuelas.

	Weir	Flygt	Fluor Daniel	Foster Wheeler
Diámetro evaluado (pulg)	3			
Velocidad de flujo (pie/s)	4,37	4,37	4,37	4,37
Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	1,79	3,00	1,81	3,27
Razón de velocidad (V/Vc)	2,44	1,46	2,41	1,34
Diámetro evaluado (pulg)	3½			
Velocidad de flujo (pie/s)	3,27	3,27	3,27	3,27
Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	1,93	3,10	1,95	3,51
Razón de velocidad (V/Vc)	1,70	1,06	1,68	0,93

Tabla 13. Estimación de la velocidad crítica de sedimentación para la línea de fondo de vacío a la formación de hojuelas (continuación).

	Weir	Flygt	Fluor Daniel	Foster Wheeler
Diámetro evaluado (pulg)	4			
Velocidad de flujo (pie/s)	2,54	2,54	2,54	2,54
Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	2,05	3,20	2,08	3,74
Razón de velocidad (V/V_c)	1,24	0,79	1,22	0,68

4.4. Verificación del Dimensionamiento de las Líneas de Suspensión en la Unidad 79, Mediante la Aplicación de una Hoja de Cálculo

En la verificación del dimensionamiento de las líneas de manejo de suspensiones de la unidad *Residue Work-up*, se utilizaron las hojas de cálculo elaboradas según las sugerencias Weir, Flygt, Fluor Daniel y Foster Wheeler, usando las propiedades de las líneas entregadas por PDVSA. Se seleccionó el diámetro usado para las líneas de acuerdo a los DTI'S estudiados (tabla 3.1) y con la información obtenida se verificó el dimensionamiento de las líneas.

La verificación de las líneas consiste en comprobar que la velocidad de transporte sea mayor a la velocidad crítica de sedimentación, y a la vez que la relación de velocidades de transporte y crítica (V/V_c) se halle en un rango desde 1,05 hasta 1,08.

En las tablas 4.8 a 4.13 se verificaron los diámetros de tubería que se usarán en la unidad 79 *Residue Work-up* evaluadas a los diámetros encontrados en los diagramas de tuberías e instrumentación de dicha unidad. Esta unidad está diseñada en base a la conversión de 85%, en la cual se encuentran los mayores flujos de suspensión y es la situación más crítica. Aun cuando el dimensionamiento se basa en esta conversión, el Límite de operación de la planta (turndown) se da a la conversión de 92%, por lo tanto habría que mantener la

velocidad de transporte en un punto adecuado para así evitar la sedimentación de los sólidos o simplemente obtener un producto de menor calidad.

Tabla 14. Verificación de la línea de residuo de hidroconversión

		Weir	Flygt	Fluor Daniel	Foster Wheeler
85% Conv.	Diámetro (pulg)	5			
	Velocidad de flujo (pie/s)	7,09	7,09	7,09	7,08
	Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	5,58	3,25	5,69	6,58
	Razón de velocidad V/Vc	1,27	2,18	1,24	1,08

Tabla 15. Verificación de la línea de fondo de vacío

		Weir	Flygt	Fluor Daniel	Foster Wheeler
85% Conv.	Diámetro (pulg)	20			
	Velocidad de flujo (pie/s)	0,84	20'' excede el límite de uso de esta metodología (ver tabla 3.2)	0,84	0,84
	Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	4,43		4,48	8,08
	Razón de velocidad V/Vc	0,19		0,19	0,10

Tabla 16. Verificación de la línea de fondo de vacío desde G-7921A/B

		Weir	Flygt	Fluor Daniel	Foster Wheeler
85% Conv.	Diámetro (pulg)	12			
	Velocidad de flujo (pie/s)	2,07	2,07	2,07	2,07
	Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	3,53	3,69	3,56	6,44
	Razón de velocidad V/Vc	0,59	0,56	0,58	0,32

Tabla 17. Verificación de la línea de reciclo caliente a la torre de vacío

		Weir	Flygt	Fluor Daniel	Foster Wheeler
85% Conv.	Diámetro (pulg)	12			
	Velocidad de flujo (pie/s)	1,78	1,78	1,78	1,78
	Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	3,53	3,80	3,56	6,44
	Razón de velocidad V/Vc	0,51	0,47	0,50	0,28

Tabla 18. Verificación de la línea de reciclo frío a la torre de vacío

		Weir	Flygt	Fluor Daniel	Foster Wheeler
85% Conv.	Diámetro (pulg)	12			
	Velocidad de flujo (pie/s)	1,77	1,77	1,77	1,77
	Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	3,46	3,80	3,50	6,39
	Razón de velocidad V/Vc	0,51	0,47	0,51	0,28

Tabla 19. Verificación de la línea de fondo de vacío a la formación de hojuelas

		Weir	Flygt	Fluor Daniel	Foster Wheeler
85% Conv.	Diámetro (pulg)	4			
	Velocidad de flujo (pie/s)	2,54	2,54	2,54	2,54
	Velocidad crítica de sedimentación (pie/s)	2,05	3,20	2,08	3,74
	Razón de velocidad V/Vc	1,24	0,79	1,22	0,68

Los cálculos realizados por los programas coinciden con los diámetros de las líneas de residuo de hidroconversión y fondo de vacío a la formación de hojuelas. Sin embargo, de acuerdo a las velocidades establecidas y a los diámetros obtenidos como respuestas de los programas, se encontraron diferencias entre

estos diámetros y los establecidos en los DTI'S. Esto pudiera explicarse a la falta de información para realizar el cálculo de las líneas; aun así, los programas fueron diseñados para dar un grado de libertad al seleccionar el diámetro, pudiendo ser cambiado a conveniencia para verificar las velocidades críticas de suspensión con las mismas propiedades de flujo.

Cuando se evaluaron las líneas de reciclo caliente a la torre de vacío, reciclo frío a la torre de vacío, fondo de vacío desde G-7921A/B y fondo de vacío con los diámetros encontrados en los DTI's y manteniendo las mismas propiedades de flujo, los programas calcularon velocidades críticas superiores a las velocidades de flujo; por lo tanto tampoco cumplieron con la condición en la cual la relación entre la velocidad de transporte y velocidad crítica de sedimentación debe estar entre 1,05 y 1,8.

En la unidad 79 no se encuentra explicación para la gran diferencia encontrada entre el diámetro de 20" especificado en la línea de fondo de vacío, y el diámetro obtenido con la aplicación de las metodologías estudiadas en este trabajo, que sugiere un diámetro de 8". Posiblemente la elección de 20" se deba a consideraciones para el cabezal neto de presión de succión (NPSH), lavado de la línea debido a la inclinación que presenta o debido a que las altas viscosidades no provocarían riesgos de sedimentación en la línea. La selección de este diámetro afecta a las líneas aguas abajo, haciendo que éstas deban tener diámetros grandes con el fin de evitar reducciones bruscas en las tuberías, lo cual no está permitido para líneas que transporten suspensiones.

La línea de fondo de vacío a la formación de hojuelas se tomó como adecuada debido a la respuesta obtenida utilizando la metodología de Fluor Daniel y Weir, ya que estas metodologías son las que arrojan resultados similares a los encontrados en los DTI'S estudiados.

Por otra parte se evidenció que la metodología propuesta por Foster Wheeler necesita una velocidad supuesta para realizar el cálculo del diámetro requerido. Sin embargo, el programa podría evaluar mejor el dimensionamiento de las líneas si se utiliza una velocidad operación como la velocidad supuesta para evaluar una línea en la cual haya riesgos de sedimentación, o cuando se quiera comprobar que la velocidad de transporte se encuentra por encima de la velocidad de salto de la partícula.

El programa según Flygt no se asemeja a los valores arrojados por los otros programas, por lo cual no se considera adecuado su uso para el dimensionamiento de las líneas de la unidad 79. Sin embargo, se evidenció que el programa se ajusta cuando la concentración de sólidos en peso es mayor, como puede ser visto para la conversión de 92% (anexo A).

El estudio realizado indica que los programas presentaron una desviación del 27,38% para seleccionar el diámetro requerido, lo cual concuerda con la teoría en donde se expresa que las correlaciones solo aportan un 25% de exactitud. Sin embargo, los problemas de suspensiones deben ser tratados en operación, para poder verificar la veracidad de las correlaciones. Debido a la falta de información sobre las velocidades a las cuales deben ser transportadas estas suspensiones, no se puede generar alguna opinión sobre la eficiencia de los programas para calcular las velocidades críticas de sedimentación; estos fueron evaluados sólo de acuerdo a la teoría.

4.5. Conclusiones

1. Las líneas estudiadas son adecuadas en cuanto a los accesorios y válvulas que las integran; sin embargo, esto no se cumple para la línea de reciclaje caliente a la torre de vacío debido a que presenta un elemento de medición de flujo del tipo placa de orificio, el cual no es aceptable para el transporte de flujos con suspensiones de sólidos.

2. Las ecuaciones recomendadas por las empresas Weir, Flygt, Fluor Daniel y Foster Wheeler son adecuadas si se cuenta con los parámetros necesarios para predecir la velocidad crítica de sedimentación y así definir el diámetro de las líneas utilizadas en el transporte de suspensiones del proyecto Conversión Profunda.

3. Las ecuaciones recomendadas por la empresa Flygt para el dimensionamiento de líneas que transportan suspensiones deberán ser utilizadas si se cuenta con los parámetros necesarios, debido a que las mismas requieren un tamaño de partícula específico.

4. Las correlaciones de Weir y Fluor Daniel resultaron ser las más adecuadas para aplicarlas al dimensionamiento de las líneas de la unidad *Residue Work-up* porque reproducen el diámetro indicado en los diagramas de tubería e instrumentación de dicha unidad, según los parámetros de flujos y líneas evaluadas en este trabajo.

5. Fue posible calcular las velocidades críticas de sedimentación para todas las líneas de transporte de suspensión del proyecto Conversión Profunda, en base a la metodología sugerida por cuatro empresas líderes en esta área.

6. No se pudieron comparar las velocidades críticas de sedimentación reales con las calculadas, debido a que no se encuentran disponibles actualmente.ç

7. Las líneas de residuo de hidroconversión y fondo de vacío a la formación de hojuelas evaluadas cumplen con la selección de diámetro adecuado, verificado por los programas según la teoría.

8. Las líneas de reciclado caliente de la torre de vacío, reciclado frío a la torre de vacío y fondo de vacío, no cumplen con la relación V/V_c , para el diámetro real de la tubería.

9. Según la literatura dedicada al transporte de suspensiones, los programas presentan una desviación aceptable del 27% para la verificación del dimensionamiento de las líneas para el manejo de suspensiones.

4.6. Recomendaciones

- Verificar con INTEVEP las velocidades de transporte y diámetro de partícula real de las líneas evaluadas con los programas desarrollados en este trabajo.

- Considerar el uso de un tubo Venturi en sustitución de la placa orificio en la línea de reciclo caliente a la torre de vacío.

- Analizar el enrutamiento de las líneas a fin de evitar la sedimentación de los sólidos a la entrada de las válvulas.

- Para mejorar el uso del programa desarrollado en el presente trabajo, se recomienda utilizar las propiedades de los fluidos con la mayor exactitud posible, esto reduciría el error en los cálculos.

- Utilizar con moderación el factor de seguridad para evitar la sedimentación en las líneas.

- Se sugiere usar de las ecuaciones utilizadas por Weir y Fluor Daniel para estimar el dimensionamiento de las líneas.

- El procedimiento de cálculo desarrollado por Foster Wheeler puede ser utilizado cuando se requiera comprobar la no-sedimentación de sólidos en la línea, si se dispone de una velocidad de flujo real.

- Realizar una modificación para el programa según Flygt, cambiando la tabla de diámetros de tubería en función del diámetro de partículas por una tabla generada cuando el proyecto esté en operación.

BIBLIOGRAFÍA

- Abulnaga, “**Slurry systems handbook**”, McGraw Hill, EEUU (2002).
- ASME B-31. “**Slurry transportation piping systems**”, The American Society of Mechanical Engineers, New York - EEUU (2003).
- B.E.A JACOBS, “**Design of slurry transport systems**”, Elsevier Science publishers Ltd, New York-EEUU (1991).
- Chhabra, R., “**Non-newtonian flow in process industries**”, Butterworth-Heinemann, EEUU (1999).
- Figuera, J., “**Dimensionamiento de un sistema de procesamiento de gas natural para una corriente proveniente de la estación C.O.A Planta**”, Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Puerto La Cruz – Venezuela (2004).
- Fluor Daniel, Inc. “**Manual de slurry**”, Venezuela (1996).
- Flygt Industries, “**Guidelines for slurry pumping**”, ITT Industries, EEUU (2002).
- Foster Wheeler, “**Fluid flow liquid slurries**”, EEUU (1982).
- García, I., “**Diseño preliminar de un sistema hidráulico para la recuperación de los productos remanentes en el terminal Marino Jose**”, Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Puerto La Cruz - Venezuela (2008).

- Historia de PDVSA, “www.Intranet.pdvsa.com”, (2004).
- http://es.wikipedia.org/wiki/Proceso_Fischer-Tropsch, Autor Muro Bot, Fecha de revisión (30/05/2010).
- Perry, R., “**Manual del ingeniero químico**”, McGraw Hill, sexta edición, México (1992).
- Vargues, L., “**Diseño preliminar del gaseoducto Barbacoa-Margarita en su ruta definitiva actual**”, Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Puerto la Cruz - Venezuela (2008).
- Vásquez, F., “**Evaluación del comportamiento del flujo bifásico aire-agua en una tubería horizontal mediante herramientas numéricas de dinámica de fluido computacional (DFC)**”, Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Puerto la Cruz - Venezuela (2009).
- Warman, “**Warman slurry pumping handbook**”, Warman international LTD, Australia (2000).
- Weir, “**Slurry transports**”, EEUU, (2002).
- Zambrano, “**Velocidad crítica de depósito en el transporte hidráulico**”, Redalyc, Colombia, (2009).

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y
ASCENSO

TÍTULO	“Evaluación de las líneas de manejo de suspensiones del proyecto conversión profunda de la refinería Puerto la Cruz”
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Bejarano A, Antonio A.	CVLAC: 18.623.425 E MAIL:a.bejaranoaguilar@gmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALABRAS O FRASES CLAVES:

Suspensiones

Velocidad crítica de sedimentación

Slurry

Sólidos

Hoja de cálculo (Excel)

Taponamiento

Tubería

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

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y ciencias aplicadas	Ingeniería Química

RESUMEN (ABSTRACT):

Se evaluaron las líneas de manejo de suspensiones de la unidad 79 (Residue Work-up) del proyecto conversión profunda de la refinería Puerto La Cruz, PDVSA. En este estudio se analizaron los regímenes de flujo en las líneas de transporte de fluidos bifásicos con suspensiones, para determinar la velocidad crítica de sedimentación, por medio de la búsqueda de ecuaciones aplicables a suspensiones (slurry) que cumplan con los rangos de las propiedades de flujo establecidas para la unidad estudiada. Por medio de las metodologías de cálculo desarrolladas por las empresas Weir, Flygt, Fluor Daniel y Foster Wheeler, se establecieron las velocidades críticas de sedimentación mediante una hoja de cálculo desarrollada en Microsoft Excel 2007 para automatizar los cálculos del dimensionamiento de las líneas De acuerdo a esto los programas de Weir y Fluor Daniel son los que arrojaron resultados más confiables para el dimensionamiento. Los resultados obtenidos con los programas poseen un porcentaje de desviación promedio del 32,22% aproximadamente, con respecto a los del dimensionamiento real de las líneas de la unidad 79 (Residue Work-up).

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Rodulfo, Arturo	ROL	CA	AS X	TU	JU
	CVLAC:	V-8.300.709			
	E_MAIL	rodulfo99@hotmail.com			
	E_MAIL				
Vicente, Rossi	ROL	CA	AS	TU X	JU
	CVLAC:	V-3.027.207			
	E_MAIL	vicenter7@gmail.com			
	E_MAIL				
Yuvi, Moreno	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	V-12.980.821			
	E_MAIL	yuvimoreno@yahoo.com			
	E_MAIL				
Lucas, Álvarez	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	V- 4.077.552			
	E_MAIL	lalvarezm57@gmail.com			
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2010	12	03
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

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

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS.evaluación_manejodesuspensiones_proyectoconversiónprofunda.doc	Application/ms word

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

ALCANCE

ESPACIAL: Departamento Conversión Profunda, edificio sede PDVSA-Guaraguao (OPCIONAL)

TEMPORAL: seis meses (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero químico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Ingeniería de procesos

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente. Núcleo de Anzoátegui

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

DERECHOS

De acuerdo con el artículo 41 del reglamento de Trabajo de Grado de la Universidad de Oriente: "los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados por otros fines con el consentimiento del consejo de núcleo respectivo, quien lo participará al consejo universitario".

Bejarano A, Antonio A

AUTOR

Arturo Rodulfo

TUTOR

Yuvi Moreno

JURADO

Lucas Álvarez

JURADO

Yraima Salas

POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS