



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

*Estado del Arte de las tecnologías utilizadas
para minimizar el arrastre de líquidos en
separadores líquido-vapor en un proceso de
acondicionamiento de gas*

María Clara Omaña Pérez(9822440)

Tutor(a) Académico: Ing. Ana Damián Katrib

Tutor(a) Industrial: Ing. María Rosa Torres Rodríguez

Caracas, Septiembre 2005

DERECHO DE AUTOR

Quien suscribe, en condición de autor del trabajo titulado **“Estado del Arte de las tecnologías utilizadas para minimizar el arrastre de líquidos en separadores líquido-vapor en un proceso de acondicionamiento de gas”**, declara que: Cedo a título gratuito, y en forma pura y simple, ilimitada e irrevocable a la Universidad Metropolitana, los derechos de autor de contenido patrimonial que me corresponden sobre el presente trabajo. Conforme a lo anterior, esta cesión patrimonial sólo comprenderá el derecho para la Universidad de comunicar públicamente la obra, divulgarla, publicarla o reproducirla en la oportunidad que ella así lo estime conveniente, así como, la de salvaguardar mis intereses y derechos que me corresponden como autor de la obra antes señalada. La Universidad en todo momento deberá indicar que la autoría o creación del trabajo corresponde a mi persona, salvo los créditos que se deban hacer al tutor o a cualquier tercero que haya colaborado o fuere hecho posible la realización de la presente obra.

Autor: María Clara Omaña Pérez

C.I: 15.501.023

En la ciudad de Caracas, a los 19 días del mes de Septiembre del año 2005.

APROBACIÓN

Considero que el Trabajo Final titulado

**“ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS UTILIZADAS PARA
MINIMIZAR EL ARRASTRE DE LÍQUIDOS EN SEPARADORES
LÍQUIDO-VAPOR EN UN PROCESO DE ACONDICIONAMIENTO
DE GAS”**

elaborado por la ciudadana

MARÍA CLARA OMAÑA PÉREZ

para optar al título de

INGENIERO QUÍMICO

reúne los requisitos exigidos por la Escuela de Ingeniería de Producción y Química de la Universidad Metropolitana, y tiene méritos suficientes como para ser sometido a la presentación y evaluación exhaustiva por parte del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Caracas, a los 09 días del mes de Septiembre del año 2005.

Ing. Ana Damián
Tutor Académico

ACTA DE VEREDICTO

Nosotros, los abajo firmantes, constituidos como jurado examinador y reunidos en Caracas, el día 19 de Septiembre de 2005, con el propósito de evaluar el Trabajo Final titulado

**“ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS UTILIZADAS PARA
MINIMIZAR EL ARRASTRE DE LÍQUIDOS EN SEPARADORES
LÍQUIDO-VAPOR EN UN PROCESO DE ACONDICIONAMIENTO
DE GAS”**

presentado por la ciudadana

MARÍA CLARA OMAÑA PÉREZ

para optar al título de

INGENIERO QUÍMICO

emitimos el siguiente veredicto:

Reprobado () Aprobado () Notable () Sobresaliente ()

Observaciones: _____

Ing. Ana Damián

Ing. María Rosa Torres

Ing. Carmen Rueda

AGRADECIMIENTO

El proyecto aquí presentado representa la culminación de un capítulo de mi vida que será inolvidable, mi formación profesional en la Universidad Metropolitana. En esta etapa de mi vida, tuve el privilegio de compartir con personas que me enseñaron a perseguir día a día el camino a la excelencia.

Principalmente mi agradecimiento va dirigido a todos los profesores de mi apreciada Escuela de Ingeniería Química, especialmente a mi tutora académica, la Ing. Ana Damián, de quién, tuve la suerte de recibir extraordinarias clases durante mis estudios universitarios y a quién agradeceré eternamente todo el cariño y apoyo que me brindó. A la Ing. Karina Álvarez, de quién me complace haber sido alumna, preparadora y amiga, y a quién siempre admiraré por su inquebrantable búsqueda de la excelencia. A mis queridos profesores del Departamento de Química, de quienes nunca olvidaré sus oportunas orientaciones y el especial cariño y ejemplo que me brindaron; especialmente el Prof. Gerardo Camacho, quién, durante los años que tuve la honra de ser su alumna y preparadora, confió plenamente en mi y fue primordial en la formación de mi carácter personal y profesional.

En la última etapa de mi formación profesional, tuve el orgullo de formar parte de un maravilloso grupo de trabajo, en la compañía DITECH, S.A. a quienes estaré eternamente agradecida por la oportunidad y el apoyo ofrecido en mi primer encuentro con el mundo profesional.

Un agradecimiento especial a mis compañeros de estudio y amigos, con quienes compartí años maravillosos, llenos de sobresaltos, propios de la etapa que vivíamos, alegrías y hermosos recuerdos que jamás olvidaré.

Finalmente quiero agradecer, a toda mi familia, a mis amados padres, quienes con su sabiduría guiaron mi camino y me ofrecieron palabras de aliento para seguir adelante; a mis hermanas quienes apoyaron siempre mis decisiones. A mis queridísimos abuelos, quienes me recibieron en su hogar durante este tiempo, brindándome su apoyo y amor incondicional, a quienes admiro y estaré agradecida por siempre; a mis queridas tías: María Carolina Pérez, quién me proporcionó fortaleza y compañía, y María Carolina Manrique cuyo apoyo, confianza y oportuna ayuda me permitieron culminar satisfactoriamente este período de mi educación; a todos mis tíos y primos por cada granito de arena aportado y por supuesto a Dios que nos mantiene con salud y nos permite vivir.

¡Gracias a todos por haber sido la parte más maravillosa de este capítulo de mi vida!

Caracas, Septiembre de 2005

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|------------|
| LISTA DE TABLAS Y FIGURAS | <i>vii</i> |
| RESUMEN | <i>xi</i> |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO I. TEMA DE INVESTIGACIÓN | 4 |
| I.1 Planteamiento del problema..... | 5 |
| I.2 Objetivos del proyecto..... | 7 |
| I.2.1 Objetivo general..... | 7 |
| I.2.2 Objetivos específicos..... | 7 |
| I.3 Justificación del problema..... | 9 |
| CAPITULO II. MARCO TEÓRICO | 10 |
| II.1 Marco conceptual..... | 11 |
| II.1.1 Separadores..... | 11 |
| II.1.2 Principios de separación..... | 12 |
| II.1.2.1 Momentum..... | 12 |
| II.1.2.2 Asentamiento por gravedad..... | 12 |
| II.1.2.3 Coalescencia..... | 13 |
| II.1.3 Partes de un separador..... | 13 |
| II.1.3.1 Sección primaria..... | 14 |
| II.1.3.2 Sección secundaria o de asentamiento..... | 14 |
| II.1.3.3 Sección de coalescencia..... | 14 |
| II.1.3.4 Sección de recolección de líquido o sumidero | 15 |
| II.1.4 Clasificación de los separadores según su función..... | 15 |
| II.1.4.1 Separadores bifásicos..... | 15 |
| II.1.4.2 Separadores trifásicos | 17 |
| II.1.4.3 Separadores tetrafásicos..... | 18 |
| II.1.5 Clasificación de los separadores según la forma | 18 |
| II.1.5.1 Separadores esféricos..... | 18 |
| II.1.5.2 Separadores cilíndricos..... | 19 |

| | | |
|----------|--|----|
| II.1.5.3 | Separadores de dos barriles..... | 22 |
| II.1.5.4 | Separadores centrífugos..... | 23 |
| II.1.6 | Dispositivos internos del separador..... | 26 |
| II.1.6.1 | Dispositivos de entrada..... | 26 |
| II.1.6.2 | Eliminadores de neblina..... | 30 |
| II.1.6.3 | Rompe vórtices..... | 42 |
| II.1.6.4 | Placas rompe espuma..... | 44 |
| II.1.6.5 | Placas rompe olas..... | 45 |
| II.1.7 | Problemas operacionales que pueden presentarse en los separadores..... | 46 |
| II.1.7.1 | Arrastre de líquidos (<i>carryover</i>)..... | 46 |
| II.1.7.2 | Arrastre de vapor (<i>carryunder</i>)..... | 47 |
| II.1.7.3 | Formación de espuma..... | 48 |
| II.1.7.4 | Taponamiento del eliminador de neblina..... | 49 |
| II.1.7.5 | Flujo de avance..... | 52 |
| II.1.7.6 | Bajas temperaturas..... | 52 |
| II.2 | Bases teóricas..... | 52 |
| II.2.1 | Teoría de asentamiento..... | 53 |
| II.2.1.1 | Ley de Newton..... | 58 |
| II.2.1.2 | Ley Intermedia..... | 59 |
| II.2.1.3 | Ley de Stokes..... | 59 |
| II.2.1.4 | Ley de Stokes-Cunningham..... | 60 |
| II.2.1.5 | Movimiento Browniano..... | 61 |
| II.2.2 | Variables operacionales incidentes en el arrastre de líquidos..... | 62 |
| II.2.2.1 | Velocidad del vapor..... | 63 |
| II.2.2.2 | Diámetro de la partícula..... | 65 |
| II.2.2.3 | Coefficiente de arrastre..... | 67 |
| II.2.2.4 | Factor de carga..... | 69 |
| II.2.2.5 | Relación líquido-vapor..... | 74 |
| II.2.2.6 | Nivel del líquido..... | 75 |
| II.2.2.7 | Tiempo de residencia..... | 76 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| II.2.2.8 | Tendencia a formar espuma..... | 79 |
| II.2.3 | Propiedades físicas de la mezcla incidentes en el arrastre de líquidos..... | 79 |
| II.2.3.1. | Densidad del líquido..... | 79 |
| II.2.3.2. | Densidad del vapor..... | 80 |
| II.2.3.3. | Viscosidad del líquido..... | 80 |
| II.2.3.4. | Viscosidad del vapor..... | 81 |
| II.2.3.5. | Tensión superficial..... | 81 |
| II.2.4 | Condiciones de operación que inciden en el arrastre de líquidos..... | 81 |
| II.2.4.1. | Presión de operación..... | 81 |
| II.2.4.2. | Temperatura de operación..... | 82 |
| II.2.4.3. | Flujos..... | 83 |
| II.2.5 | Incidencia de la instrumentación en el arrastre de líquidos..... | 83 |
| II.3 | Estado del Arte..... | 84 |
| II.3.1 | Tecnologías y tendencias..... | 84 |
| II.3.1.1. | Eliminadores de neblina tipo malla..... | 85 |
| II.3.1.2. | Eliminadores de neblina tipo vanes..... | 88 |
| II.3.1.3. | Internos ciclónicos..... | 90 |
| II.3.1.4. | Otras tecnologías..... | 95 |
| II.3.1.5. | Internos de superficie tratada..... | 99 |
| II.3.2 | Modelado computarizado..... | 103 |
| II.4 | Antecedentes..... | 104 |
| II.5 | Marco referencial..... | 105 |
| II.5.1 | Resumen de la empresa DITECH, S.A..... | 105 |
| II.5.2 | Proyecto <i>Acondicionamiento de Gas en Fuentes de Producción (AGFP)</i> | 105 |
| II.5.2.1. | Planta de Refrigeración Mecánica con Propano..... | 106 |
| II.5.2.2. | Planta de Enfriamiento por Aire..... | 106 |
| II.5.3 | Carryover en la red norte de PDVSA..... | 108 |
| II.5.4 | Evaluación de los separadores líquido-vapor..... | 109 |

| | |
|--|------------|
| CAPITULO III. MARCO METODOLÓGICO..... | 112 |
| III.1 Tipo de investigación..... | 113 |
| III.2 Diseño de investigación..... | 114 |
| III.3 Variables y operacionalización..... | 114 |
| III.4 Unidad de estudio y población..... | 115 |
| III.4.1 Separadores líquido-vapor de la Estación de Flujo Carito..... | 115 |
| III.4.2 Separadores líquido-vapor de la Estación de Flujo Musipán..... | 116 |
| III.4.3 Separadores líquido-vapor de la Estación de Flujo Santa Bárbara..... | 116 |
| III.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos..... | 116 |
| III.6 Procedimiento metodológico..... | 117 |
| III.6.1 Procedimiento metodológico para realizar el Estado del Arte..... | 117 |
| III.6.1.1 Fase Heurística..... | 117 |
| III.6.1.2 Fase Hermenéutica..... | 118 |
| III.6.2. Procedimiento metodológico para realizar la evaluación de los separadores líquido-vapor del proyecto AGFP..... | 118 |
| III.6.2.1 Configuración geométrica del separador líquido-vapor..... | 119 |
| III.6.2.2 Verificación del tiempo de residencia del líquido según los niveles de líquido en los separadores..... | 119 |
| III.6.2.3 Verificación del arrastre de líquido en el vapor de salida de los separadores..... | 120 |
| CAPITULO IV. ANÁLISIS Y RESULTADOS..... | 121 |
| IV.1 Tecnologías y tendencias actuales para evitar el arrastre de líquido en los separadores líquido-vapor..... | 122 |
| IV.2 Dispositivos internos de los separadores líquido-vapor..... | 122 |
| IV.3 Incidencia de las condiciones de operación en el <i>carryover</i> | 124 |
| IV.4 Efecto de la instrumentación del equipo en el <i>carryover</i> | 124 |
| IV.5 Evaluación de la configuración de los separadores líquido-vapor..... | 125 |
| IV.6 Verificación del tiempo de residencia de líquido según los niveles del separador..... | 126 |

| | |
|--|------------|
| IV.7 Verificación del arrastre de líquido en el vapor de salida de los separadores..... | 127 |
| CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 129 |
| V.1 Conclusiones..... | 130 |
| V.2 Recomendaciones..... | 134 |
| V.2.1 Recomendaciones para el proyecto Acondicionamiento de Gas es Fuentes de Producción..... | 134 |
| V.2.2 Recomendaciones para Estudios y Proyectos DITECH, S.A..... | 135 |
| V.2.3 Recomendaciones generales..... | 135 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 136 |
| APÉNDICES..... | 142 |
| APÉNDICE A. NOMENCLATURA Y ABREVIACIONES..... | 143 |
| APÉNDICE B..... | 146 |
| APÉNDICE C..... | 148 |
| APÉNDICE D..... | 150 |
| APÉNDICE E..... | 152 |
| APÉNDICE F..... | 154 |
| APÉNDICE G. DIAGRAMAS DE FLUJO DE PROCESOS..... | 156 |
| APÉNDICE G.1 Diagramas de flujo de procesos de la Planta de Refrigeración Mecánica con Propano para el Gas del Nivel de 60 psig y la Planta de Enfriamiento por Aire para el Gas del Nivel de 450 psig de la Estación de Flujo Carito..... | 157 |
| APÉNDICE G.2 Diagramas de flujo de procesos de la Planta de Refrigeración Mecánica con Propano para el Gas del Nivel de 60 psig y la Planta de Enfriamiento por Aire para el Gas del Nivel de 450 psig de la Estación de Flujo Musipán..... | 160 |
| APÉNDICE G.3 Diagramas de flujo de procesos de la Planta de Refrigeración Mecánica con Propano para el Gas del Nivel de 60 psig y la Planta de Enfriamiento por Aire para el Gas del Nivel de 450 psig de la Estación de Flujo Santa Bárbara..... | 163 |

| | |
|--|------------|
| APÉNDICE H. HOJAS DE DATOS DE LOS SEPARADORES LÍQUIDO-VAPOR..... | 166 |
| APÉNDICE H.1 Hojas de datos del separador líquido-vapor V-601 diseñado para la Planta de Refrigeración Mecánica con Propano para el Gas del Nivel de 60 psig de la Estación de Flujo Carito..... | 167 |
| APÉNDICE H.2 Hojas de datos del separador líquido-vapor V-301 diseñado para la Planta de Enfriamiento por Aire para el Gas del Nivel de 450 psig de la Estación de Flujo Carito..... | 169 |
| APÉNDICE H.3 Hojas de datos del separador líquido-vapor V-701 diseñado para la Planta de Refrigeración Mecánica con Propano para el Gas del Nivel de 60 psig de la Estación de Flujo Musipán..... | 171 |
| APÉNDICE H.4 Hojas de datos del separador líquido-vapor V-401 diseñado para la Planta de Enfriamiento por Aire para el Gas del Nivel de 450 psig de la Estación de Flujo Musipán..... | 173 |
| APÉNDICE H.5 Hojas de datos del separador líquido-vapor V-801 diseñado para la Planta de Refrigeración Mecánica con Propano para el Gas del Nivel de 60 psig de la Estación de Flujo Santa Bárbara..... | 175 |
| APÉNDICE H.6 Hojas de datos del separador líquido-vapor V-501 diseñado para la Planta de Enfriamiento por Aire para el Gas del Nivel de 450 psig de la Estación de Flujo Santa Bárbara..... | 177 |
| APÉNDICE I..... | 179 |

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

TABLAS

1. Clasificación general de la orientación de los separadores cilíndricos según el servicio que prestará la unidad, 22
2. Principales ventajas y desventajas de los separadores centrífugos, 25
3. Características generales de los eliminadores de neblina tipo malla, 35
4. Principales características de los eliminadores de neblina tipo vanes, 38
5. Principales características de los eliminadores de neblina centrífugos, 39
6. Principales características de los eliminadores de neblina tipo lechos de fibra, 41
7. Rango de valores para los que aplica la Ley de Newton, 58
8. Rango de valores para los que aplica la Ley Intermedia, 59
9. Rango de valores para los que aplica la Ley de Stokes, 60
10. Rango de valores para los que aplica la Ley de Stokes-Cunningham, 61
11. Rango de valores para los que aplica el Movimiento Browniano, 61
12. Tamaño de la partícula a fijar para el dimensionamiento de un separador sin eliminador de neblina según el servicio que se requiere, 66
13. Tamaños de las partículas según la aplicación en procesos típicos, 67
14. Rango de valores obtenidos para el término, 69
15. Valores típicos del factor de carga utilizados para el dimensionamiento de separadores líquido-vapor con eliminador de neblina tipo malla, según la configuración del separador, 70
16. Valores del factor de carga “K” propuestos en separadores líquido-vapor según la orientación del separador, 73
17. Valores del factor de carga “K” permitidos en separadores líquido-vapor según el *disengaging height* o altura por encima del eliminador de neblina tipo malla de densidad 12 lb/ft^3 , 73
18. Factor de corrección del “K” seleccionado, según el valor admisible en función de la presión de operación del separador, 74

19. Siglas según las cuales se identifican los niveles de líquido en un separador líquido-vapor, 75
20. Tiempos de retención típicos según la gravedad API del crudo en separadores líquido-vapor, 77
21. Condiciones de operación de las Plantas de Refrigeración Mecánica con Propano del Gas de Nivel de 60 psig y las Plantas de Enfriamiento con Aire del Gas de Nivel de 450 psig de todas las Estaciones de Flujo, 110
22. Flujos máxicos de los separadores de la Estación de Flujo Carito, 125
23. Flujos máxicos de los separadores de la Estación de Flujo Musipán, 125
24. Flujos máxicos de los separadores de la Estación de Flujo Santa Bárbara, 126
25. Tiempo de residencia del líquido en cada nivel de los separadores de la Estación de Flujo Carito, 126
26. Tiempo de residencia del líquido en cada nivel de los separadores de la Estación de Flujo Musipán, 126
27. Tiempo de residencia del líquido en cada nivel de los separadores de la Estación de Flujo Santa Bárbara, 127
28. Velocidad crítica y velocidad del vapor en los separadores de la Estación de Flujo Carito, 127
29. Velocidad crítica y velocidad del vapor en los separadores de la Estación de Flujo Musipán, 127
30. Velocidad crítica y velocidad del vapor en los separadores de la Estación de Flujo Santa Bárbara, 128
31. Valores del factor de carga del sistema, utilizados para el dimensionamiento de separadores líquido-vapor, según el tipo de eliminador de neblina y las condiciones del servicio para las cuales se diseña, 151
32. Tiempos de retención de las partículas líquidas, en función de la distancia a recorrer entre dos niveles de líquido, para separadores de orientación horizontal y vertical, 153
33. Descripción de las actividades a realizar en cada etapa de diseño, asociadas a un proyecto de ingeniería realizado en una empresa consultora, 155

FIGURAS

1. Secciones de un separador líquido-vapor, 13
2. Esquema de un separador esférico, 19
3. Esquema de un separador líquido-vapor vertical, 20
4. Esquema de un separador líquido-vapor horizontal, 21
5. Esquema de un separador de dos barriles, 23
6. Esquema de un separador ciclónico, 24
7. Diversas configuraciones de las placas deflectoras, 27
8. Deflector de entrada tipo media esfera, 28
9. Distribuidor de entrada en forma de “T” en un separador vertical, 29
10. Dispositivo ciclónico de entrada, 30
11. Eliminador de neblina tipo malla de configuración cilíndrica, 32
12. Sección anterior y posterior de un eliminador de neblina tipo malla, 33
13. Tipo de tejido de alambre metálico típico de un eliminador de neblina tipo malla, 34
14. Eliminador de neblina tipo malla co-tejida que incluye filamentos de fibra de vidrio, 34
15. Esquema de la captura de las partículas en un arreglo de vanes con flujo vertical, 37
16. Eliminador de neblina tipo ciclón, 40
17. Rejillas rompe vórtices, 43
18. Placas rompe vórtices, 43
19. Placas rompe espuma, 44
20. Placas rompe olas, 46
21. Diagrama de fuerzas que actúan sobre una partícula líquida en una corriente de vapor, 53
22. Niveles de líquido en un separador líquido-vapor, 75
23. Equipo coalescedor, 100

24. Esquema de un coalescedor con superficie tratada químicamente (izquierda) y otro coalescedor con superficie no tratada (derecha), *101*
25. Configuración de los eliminadores de neblina en las diversas orientaciones en que pueden ser instalados en los separadores líquido-vapor, *147*
26. Gráfica para estimar el coeficiente de arrastre, *149*
27. Instalación de un eliminador de neblina tipo MistFix™ adentro y afuera de un recipiente, *180*

RESUMEN

ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS UTILIZADAS PARA MINIMIZAR EL ARRASTRE DE LÍQUIDOS EN SEPARADORES LÍQUIDO-VAPOR EN UN PROCESO DE ACONDICIONAMIENTO DE GAS

Autor: *María Clara Omaña Pérez*

Tutor Académico: *Ana Damián Katrib*

Tutor Industrial: *María Rosa Torres Rodríguez*

Caracas, Septiembre de 2005

El Estado del Arte presentado tuvo como objetivo recopilar la información disponible sobre las tecnologías y tendencias actuales, con respecto a la disminución del arrastre de líquidos en el tope de los separadores líquido-vapor, diseñados en los procesos de acondicionamiento de gas. La información recopilada será aprovechada por el Departamento de Procesos de Estudios y Proyectos DITECH, S.A. para ampliar el tema e incluirla al proyecto realizado para PDVSA bajo el nombre de “Acondicionamiento de Gas en Fuentes de Producción”.

Para lograr el objetivo del proyecto, fue necesario estudiar como inciden algunas variables de diseño, operación y propiedades de la mezcla a separar, así como también, comprender la influencia de la instrumentación normalmente instalada en estos equipos, para evaluar los separadores diseñados en el proyecto mencionado y anexar la información sobre los métodos para minimizar el arrastre de líquidos en los separadores.

Finalmente se expusieron propuestas que pretenden incluir tecnologías innovadoras existentes en el mercado mundial, que en teoría deberían disminuir las consecuencias indeseables del fenómeno estudiado, así como el uso de programas de modelaje en el diseño de los separadores.

INTRODUCCIÓN

Los equipos de compresión en las plantas de acondicionamiento de gas de PDVSA en el Distrito Norte de Monagas, presentan desde hace tiempo fallas periódicas debido a la presencia de líquidos en el gas de succión proveniente de las Estaciones de Flujo de dicha red. Las paradas de plantas y fallas en estos equipos, afectan la red de distribución y originan la quema de gas rico que pudo haber sido comprimido.

Estas indeseables consecuencias, han hecho que hoy en día el monitoreo y control del arrastre de líquidos en los separadores de producción de las Estaciones de Flujo del distrito, adquiera una gran importancia; por esta razón, PDVSA solicitó un estudio para solventar la problemática asociada al fenómeno del arrastre, a fin de evitar el impacto en la capacidad de operación y transferencia del gas natural en la red.

El estudio denominado *Acondicionamiento de Gas en Fuentes de Producción*, fue solicitado a la consultora **Estudios y Proyectos DITECH, S.A**, empresa dedicada a la ingeniería, procura y construcción de proyectos integrales orientados a la industria petrolera en Venezuela. El Departamento de Procesos de DITECH, S.A, promovió la elaboración del Estado del Arte sobre las tecnologías, mejoras, patentes y tendencias *actuales* para minimizar el arrastre de líquidos en estas unidades, debido a la necesidad de estar a la vanguardia de un mercado cambiante, en una época en la que la tecnología avanza velozmente; además de considerar, que las razones del arrastre de líquidos en separadores bifásicos, conocidas ampliamente, son analizadas rara vez a fondo.

Podría decirse que el siglo XXI, desde el punto de vista tecnológico, es una época marcada por la “miniaturización” de las cosas. Hoy en día, cuando se habla de equipos más pequeños (al contrario de lo que podía pensarse décadas atrás), se alude a equipos que en general aportarán mayores eficiencias, menores tamaños, utilizarán tecnologías más innovadoras, pero como es de esperarse serán más costosos. Sin embargo, en los procesos de acondicionamiento de gas, el costo implicado en una mejor separación del líquido, es pequeño en comparación a los costos que implicaría el daño de equipos aguas abajo o la parada de una planta.

En los procesos de separación mecánica, la disminución del tamaño no necesariamente implica entonces una elevación en el costo total de la facilidad y a largo plazo se observarán los beneficios de la instalación de equipos más eficientes, compactos, que disminuyen el área física requerida para la instalación y el tamaño de los dispositivos internos que se instalan en él. Estas razones, han causado el auge de la **nueva era de la tecnología centrífuga**, que ha traído equipos más eficientes, de menor tamaño y peso, factores sumamente importantes por ejemplo en instalaciones costa afuera.

La tecnología compacta en separación física, no sólo ofrece ventajas en cuanto a las dimensiones de los equipos, sino que además permite trabajar con servicios propensos a la formación de espumas y al manejo de sólidos, sin que estos sean un problema más; sin embargo, esta tecnología aún se encuentra en la etapa de desarrollo.

En cuanto a la evaluación de los procedimientos utilizados en la separación mecánica, estos se ven obstaculizados ya que no existen metodologías aceptadas universalmente para realizar dicho proceso evaluativo. Por esta razón, el proyecto de investigación realizado pretendió realizar recomendaciones en base a *suposiciones teóricas*, que posteriormente podrían ser examinadas empíricamente.

El presente informe consta de un primer capítulo sobre el tema de investigación, en el que se plantea el estudio, los objetivos perseguidos y la justificación del tema desarrollado. Posteriormente en el segundo capítulo, se presenta el marco teórico, en el cual se definen los conceptos y bases teóricas más importantes para comprender el estudio realizado, el Estado del Arte elaborado, una pequeña reseña sobre las investigaciones realizadas anteriormente y el marco referencial en el que se desarrolló el proyecto de ingeniería, producto del cual surgió el tema de investigación. En el tercer capítulo, se describe el proceso metodológico seguido para cumplir con los objetivos del proyecto, un cuarto capítulo presenta los resultados obtenidos y el análisis realizado. Por último en el quinto capítulo, se exponen las conclusiones y recomendaciones. Adicionalmente se agregaron algunos documentos del proyecto Acondicionamiento de Gas en Fuentes de Producción, necesarios para comprender el proceso en estudio.

CAPÍTULO I

TEMA DE INVESTIGACIÓN

I.1 Planteamiento del problema

Estudios y Proyectos DITECH, S.A entregó en Abril de 2005 la ingeniería básica del proyecto *Acondicionamiento de Gas en Fuentes de Producción (AGFP)* a **Petróleos de Venezuela S.A**, estudio cuya finalidad es, minimizar la formación de condensados de hidrocarburos y agua, en los gasoductos de recolección que transportan el gas natural de la Red Norte en el Distrito Monagas.

Estos gasoductos transportan el gas desde las Estaciones de Flujo Carito, Musipán y Santa Bárbara todas en el Estado Monagas, hasta el Centro Operativo Muscar, para su procesamiento y posterior transferencia y distribución. El diseño del proyecto incluyó, entre otras cosas, la ingeniería básica de los siguientes procesos:

- *La Planta de Refrigeración Mecánica con Propano*, para el tratamiento del gas del nivel de 60 psig.
- *La Planta de Enfriamiento por Aire*, para el tratamiento del gas del nivel de 450 psig.

La operación a que se refiere este proyecto, frecuentemente se ve desmejorada, por el arrastre de líquidos que ocurre en los separadores, en la corriente gaseosa de salida, lo cual puede dañar severamente equipos aguas abajo en la línea de gas, además de tener un impacto directo indeseable, en la operación y capacidad de transferencia del gas natural en la red.

Debido a este problema, surgió la necesidad de conocer el Estado del Arte, sobre las tecnologías y mejoras que se implementan actualmente en el mundo, en aras de minimizar el arrastre de líquidos en los separadores líquido-vapor.

Esta investigación incluyó también la identificación de la incidencia en el arrastre de las variables de diseño de los separadores, las condiciones de operación, la instrumentación y los internos diseñados para las unidades, y las propiedades físicas del líquido y del vapor que se manejan en los separadores que se diseñaron para cada planta; debido a que estas características pueden incidir de una u otra forma a maximizar el arrastre en los separadores en estudio.

I.2 Objetivos del proyecto

I.2.1 Objetivo general

Efectuar una investigación completa del Estado del Arte, sobre las tecnologías, tendencias y mejoras que se aplican satisfactoriamente en el mundo, para minimizar el arrastre de líquido en la corriente de vapor de salida de separadores líquido-vapor, con el fin de evaluar los separadores diseñados para el proyecto Acondicionamiento de Gas en Fuentes de Producción.

I.2.2 Objetivos específicos

- Explorar las tecnologías, mejoras y tendencias actuales, que se llevan a cabo en el mundo, para evitar el arrastre de líquidos, en el vapor de salida, de los separadores líquido-vapor con el fin de realizar el Estado del Arte.
- Identificar las variables de diseño y las propiedades físicas de los fluidos, que intervienen en el arrastre de líquidos, en el vapor de salida, de los separadores líquido-vapor.
- Evaluar los dispositivos internos de los separadores, como variables que actúan sobre el arrastre de líquidos, en el vapor de salida, de los separadores líquido-vapor.
- Evaluar las condiciones de operación de los separadores líquido-vapor

diseñados en el proyecto Acondicionamiento de Gas en Fuentes de Producción con el fin de conocer su posible incidencia en el arrastre de líquidos.

- Evaluar la incidencia de la instrumentación de los equipos diseñados, en el arrastre de líquidos, en el vapor de salida, de los separadores líquido-vapor.
- Comparar el Estado del Arte con la tecnología diseñada para el proyecto Acondicionamiento de Gas en Fuentes de Producción, con el fin de realizar recomendaciones actualizadas, de los separadores líquido-vapor.

I.3 Justificación del problema

La gran importancia en la determinación del tratamiento que este problema recibe en la actualidad, radica en que si bien es cierto que se sabe que esta situación se produce en los procesos de acondicionamiento de gas, también es cierto que las tendencias mundiales y las tecnologías implementadas para tratar este tipo de inconvenientes mejoran a medida que avanzan los años, por lo cual fue necesario detenerse a estudiar de qué manera y cuáles son las variables que inciden en el arrastre de líquidos y cómo está siendo tratado el tema actualmente en el mundo.

De esta forma la realización de esta investigación intentó poner de manifiesto los posibles mecanismos que permitan mejorar la operación de estas unidades y así implementar la mejor solución para satisfacer las expectativas de calidad, que el cliente (PDVSA), demanda de la compañía (Estudios y Proyectos DITECH, S.A).

Además, este estudio permitió al Departamento de Procesos de Estudios y Proyectos DITECH, S.A mantener actualizada la información que ya posee, sobre las variables más importantes que se deben considerar, en la evaluación de separadores líquido-vapor y las tecnologías exitosas, actualmente en uso, para su utilización en proyectos futuros. Esta investigación permitió hacer una actualización en el *procedimiento de diseño de separadores líquido-vapor* del Departamento de Proceso, al cual se incorporaron algunas recomendaciones producto de este proyecto de investigación.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

II.1 Marco conceptual

El proceso de separación mecánica de distintas fases, es una de las operaciones básicas en la producción, el procesamiento y el tratamiento del gas natural y el petróleo (Arnold, 1999).

Esta operación unitaria, permite separar los diversos componentes de una mezcla de gas natural, hidrocarburos y agua, de forma tal de optimizar el procesamiento y la comercialización del crudo y el gas. Este proceso se lleva a cabo en un recipiente conocido generalmente como *separador*.

El diseño correcto de este recipiente, es extremadamente importante, debido a que el proceso de separación, es frecuentemente la operación unitaria inicial en una planta química, y un diseño incorrecto del mismo, puede traer consecuencias indeseadas aguas abajo de la planta.

II.1.1 Separadores

Según Martínez (2004): “Un separador es un dispositivo mecánico usado en la separación de líquidos (agua, hidrocarburos, glicol, aminas, etc.) de los gases”. Es un tambor metálico (generalmente de acero) que opera a una presión dada, el cual es utilizado para separar una mezcla, de forma tal, que la porción de la fase vapor salga por la parte superior del recipiente y los condensados¹ por la parte inferior.

¹ Según el autor citado previamente, se conoce como **condensados** a los líquidos producidos por los efectos de la condensación. Aún cuando se puede referir a hidrocarburos en estado líquido y agua, se utiliza específicamente en algunos casos para denominar a los hidrocarburos que se forman de los vapores del gas natural como consecuencia de los cambios de presión y temperatura.

II.1.2 Principios de separación

PDVSA (1995a), describe los principios fundamentales que tienen que tenerse en cuenta en la separación física de varias fases, como se enumeran a continuación. Sin embargo, aunque toda separación puede emplear uno o más de estos principios, se debe tener en cuenta que las condiciones para que dos fases sean separables son: que exista un diferencial entre las densidades de ambos fluidos y que las fases sean inmiscibles entre sí.

II.1.2.1 Momentum

Alonso (1995), define el *momentum lineal* de una partícula como: “el producto de su masa por su velocidad. Esta es una cantidad vectorial y tiene la misma dirección que la velocidad. Es un concepto que combina dos elementos que caracterizan el estado dinámico de una partícula” (p. 82).

En otras palabras, el *momentum*, es la cantidad de movimiento que tiene un fluido de cierta densidad. Así, cuando una mezcla bifásica es sometida a un cambio violento en su dirección, ambos fluidos alcanzarán diferentes velocidades debido a que poseen distintas densidades.

II.1.2.2 Asentamiento por gravedad

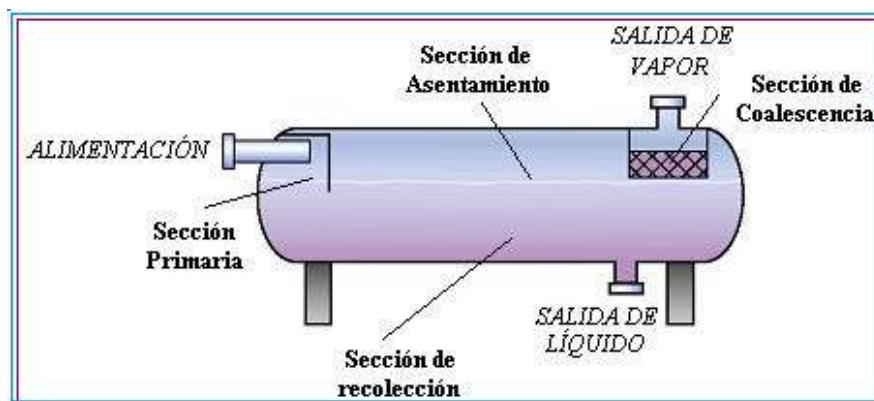
La separación por gravedad resulta, cuando la fuerza gravitacional que actúa sobre la partícula líquida, supera a la fuerza de arrastre que el vapor ejerce sobre la partícula a separar.

II.1.2.3 Coalescencia

Es el fenómeno por medio del cual partículas líquidas de tamaño pequeño (que no se separan fácilmente por la acción de la gravedad), se unen entre sí para formar partículas de mayor tamaño, que sí pueden separarse posteriormente por asentamiento gravitatorio.

II.1.3 Partes de un separador

Aún cuando los separadores pueden tener distintas configuraciones, generalmente poseen una sección primaria o de entrada, una sección secundaria donde las fases fluyen libremente y una sección de recolección del líquido separado. Sin embargo puede existir una cuarta sección, si los separadores poseen una zona en el tope en donde se pueden colocar dispositivos internos de coalescencia, que permiten aumentar la eficiencia de separación, tal y como se muestra en la figura 1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. Secciones de un separador líquido-vapor

Estas secciones o zonas pueden ser descritas de la siguiente manera:

II.1.3.1 Sección primaria

Es aquella parte del separador en la cual ocurre la separación inicial y en donde se separan esencialmente la fase líquida y la fase vapor, debido al cambio de *momentum*. Puede contener una boquilla de entrada, que puede dirigir el fluido tangencialmente o un deflector de entrada para aprovechar los efectos inerciales de un cambio abrupto en la dirección para separar la mayor cantidad posible de líquido de la corriente de vapor.

II.1.3.2 Sección secundaria o de asentamiento

Es la parte libre del separador en la cual, teóricamente, el vapor fluye a una velocidad relativamente baja y con poca turbulencia; en esta parte del separador, las partículas líquidas (aquellas que llegan a cierto tamaño), son separadas del flujo de vapor debido a la acción de la gravedad, mientras que el resto de las partículas líquidas (aquellas que no alcanzan el tamaño necesario), flotarán en el vapor.

En esta sección del recipiente, se utiliza únicamente la aceleración de la gravedad como mecanismo para inducir la separación de las fases. Se diseña en base al área del equipo, tal que no haya reatrapamiento de las partículas ya separadas.

II.1.3.3 Sección de coalescencia

Es la sección del separador en la cual se utilizan dispositivos de choque, en

donde las partículas líquidas más pequeñas colisionan para unirse entre sí, y convertirse en partículas de mayor tamaño para que puedan ser separadas posteriormente por asentamiento gravitatorio. En esta parte del separador, se eliminan las partículas líquidas más pequeñas de la corriente de vapor, según el criterio de arrastre que se emplee.

II.1.3.4 Sección de recolección de líquido o sumidero

Es el espacio del separador adoptado para recoger el líquido decantado proveniente de las secciones anteriormente descritas. El líquido, es recolectado en el fondo del recipiente, el cual deberá tener un volumen dado, dependiendo de los requerimientos del sistema, del tiempo necesario para desgasificar el líquido recolectado y para prevenir los tapones, mejor conocidos según su nombre en inglés como *slugs*, además del volumen mínimo requerido de emergencia para que los controladores funcionen correctamente.

II.1.4 Clasificación de los separadores según su función

Los separadores pueden ser clasificados en diversas categorías según la función que realiza; a continuación se presenta un resumen de los tipos de separadores según las fases que separa, teniendo en cuenta que la mezcla de alimentación puede ser bifásica, trifásica o tetrafásica, según lo expuesto por Martínez (2004).

II.1.4.1 Separadores bifásicos

Son recipientes utilizados para separar mezclas bifásicas, y se pueden

subdividir en:

a) Separadores líquido-vapor

Tal y como su nombre lo indica, este tipo de unidades separa mezclas bifásicas compuestas por una fase vapor y una fase líquida. En esta categoría se pueden encontrar algunos separadores conocidos específicamente según la actividad a desarrollar como:

- *Depurador o Scrubber*: Son separadores sencillos, utilizados principalmente para remover pequeñas cantidades de líquido de una gran cantidad de vapor. Son recipientes diseñados generalmente, de forma vertical y se colocan en la succión de compresores, aguas arriba de contactores y sistemas combustibles, o como separadores secundarios aguas abajo de un separador primario (Campbell, 1976).
- *Slug Catcher*: Es un separador diseñado particularmente para recibir grandes volúmenes de líquido en intervalos irregulares.
- *Line Drip*: Típicamente utilizados para altas relaciones vapor-líquido, en las que se desea asegurar que la línea de salida sólo contenga vapor.
- *Tanques Flash*²: Son recipientes utilizados para separar el vapor que se produce debido a la expansión de un líquido.
- *Knock Out Drums (KOD) o Trampas*: Son recipientes diseñados para disgregar mezclas con una relación vapor/líquido alta, es decir la cantidad de vapor a manejar es grande con respecto a la cantidad de líquido. Estos

² Según Martínez (2004), en la Ingeniería Química, el término *flash*, se utiliza para precisar el cambio súbito que sufre un fluido al disminuir bruscamente la presión.

separadores tienen poca capacidad para la retención del líquido, el cual generalmente se encuentra en forma de niebla³.

- *Separadores ciclónicos*: Son separadores que emplean como fuerza motriz para la separación la fuerza centrífuga, en lugar de la fuerza de gravedad.
- *Filtros Separadores*: Separadores que poseen elementos filtrantes diseñados específicamente para retener partículas de un tamaño determinado. Este tipo de equipos, contiene un filtro coalescente para la separación inicial del líquido y el vapor y posee además, un eliminador de neblina capaz de remover las partículas líquidas que puedan haber quedado retenidas en el vapor.

b) Separadores líquido-líquido

La mezcla bifásica está compuesta por dos fases líquidas inmiscibles. En esencia, es una unidad exacta a un separador líquido-vapor, pero con velocidades mucho más bajas y en las que la separación es mucho más difícil.

II.1.4.2 Separadores trifásicos

Son recipientes que se utilizan para separar mezclas en las que se encuentran una fase vapor y dos fases líquidas inmiscibles de densidades distintas.

³ La *niebla* o *neblina* es el término utilizado para definir las partículas de tamaño pequeño de líquido, que se encuentran dispersas en el vapor que fluye con el a la misma velocidad. Mientras menor sea el tamaño de las partículas, más se asemejaran las características del líquido a las del vapor que lo transporta, (Martínez, 2004).

II.1.4.3 Separadores tetrafásicos

Son recipientes que se utilizan para separar mezclas trifásicas que incluyen una sección para la separación de la espuma que se forma (Martínez, 2004).

II.1.5 Clasificación de los separadores según la forma

La selección de la configuración de un separador, debe fundamentarse, tanto en la optimización del diseño (dependiendo del servicio para el cual se requiere) como en la factibilidad económica. Para ello es importante tener en cuenta el servicio para el cual se diseña la unidad, así como también algunas variables que se pueden manipular, de manera que se puedan disminuir los costos del equipo.

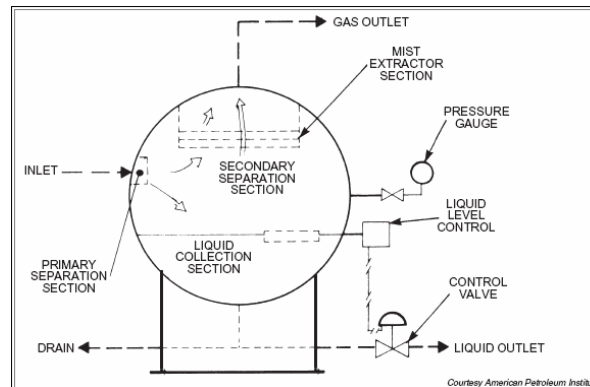
Tal y como lo expone PDVSA (1995a), los separadores se pueden clasificar según su forma en:

II.1.5.1 Separadores esféricos

Estos separadores son de forma esférica, y se utilizan en servicios en los que se tienen gases a altas presiones, en los que se requieren tamaños compactos y cuando los volúmenes de líquidos que se tienen son pequeños.

Este tipo de separadores no es muy utilizado en la industria petrolera, debido a que tienen una capacidad de almacenamiento de líquidos muy pequeña y además su construcción es difícil (Arnold, 1999).

A continuación se presenta un esquemático de un separador esférico:



Fuente: G.P.S.A (1998).

Figura 2. Esquema de un separador esférico.

II.1.5.2 Separadores cilíndricos

Son separadores cuyo cuerpo (espacio entre los cabezales) es un cilindro de acero, generalmente; éstos pueden ser a su vez divididos según su orientación en horizontales y verticales. A continuación se muestran las principales ventajas que ofrece cada configuración.

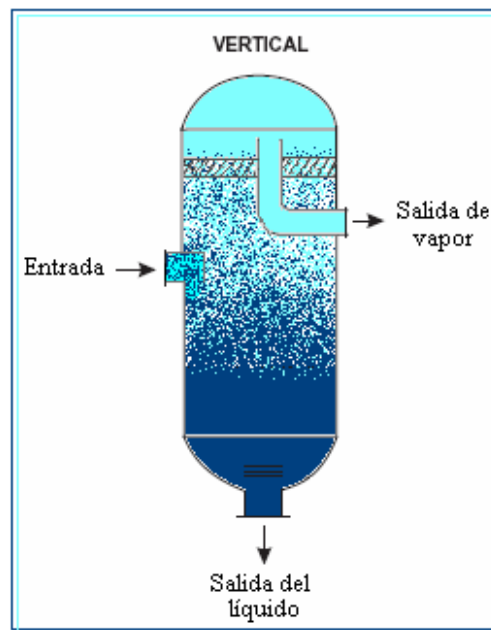
a) Separadores verticales

Su uso es más frecuente cuando:

- Se tienen *altas* relaciones vapor-líquido, es decir, servicios en los que hay *mayor cantidad de vapor* que de líquido.
- Se tiene poco espacio *horizontal* (ejemplo: tecnología costa afuera).
- Se manejan mezclas que contienen *sólidos o arenas*, debido a la facilidad que ofrecen para su remoción.
- Se esperan grandes variaciones en el flujo de vapor.
- Se necesita una mayor facilidad para controlar el nivel de líquido.

Se requiere una mayor facilidad para la instalación física de la instrumentación de control, alarmas e interruptores.

A continuación, en la figura 3 se muestra un esquema típico de un separador vertical:



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Esquema de un separador líquido-vapor vertical.

Esta configuración ofrece menor factibilidad a que se produzcan *slugs* y *flujos de avance*. En este tipo de separadores, la separación en la zona de asentamiento es más difícil, debido a que las partículas líquidas caen en contracorriente al flujo de vapor.

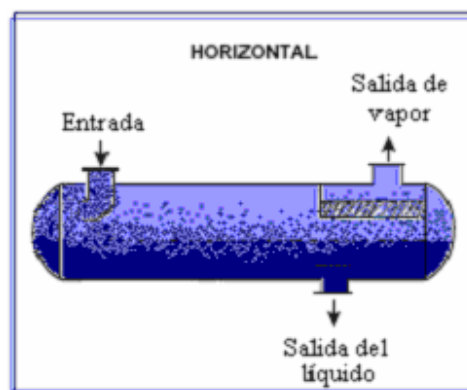
Además el uso de eliminadores de neblina puede reducir significativamente la altura de la unidad.

b) Separadores horizontales

Su uso es más frecuente cuando:

- Se tienen *bajas* relaciones vapor-líquido, es decir, cuando se tienen servicios en los que hay *mayor cantidad de líquido* que de vapor.
- Se tiene poco espacio *vertical*.
- Se manejan mezclas con tendencia a *formar espumas y emulsiones*.
- Se va a realizar una separación líquido-líquido o una separación trifásica o tetrafásica.
- Se requiere desgasificar un líquido, debido a que esta configuración tiene mayor área superficial para realizar esta acción.
- Se requiere tener una mayor facilidad para realizar el mantenimiento y supervisión del equipo.

A continuación en la figura 4 se muestra un esquemático de un separador horizontal:



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Esquema de un separador líquido-vapor horizontal.

Esta configuración tiene *mayor* factibilidad de que se produzcan *slugs* y de que se forme el *flujo de avance*. Sus fundaciones son menos costosas que las de los separadores verticales equivalentes y para una cantidad dada de vapor, requieren menor diámetro que un separador vertical. En este tipo de separadores, la separación en la zona de asentamiento es más fácil, debido a que las partículas líquidas caen perpendicularmente al flujo de vapor. En la tabla 1 se exponen las configuraciones de los separadores según el servicio requerido.

Tabla 1. Clasificación general de la orientación de los separadores cilíndricos según el servicio que prestará la unidad.

| Servicio | Orientación |
|---|-------------|
| Acumulador de reflujo | Horizontal |
| KO de gas combustible | Vertical |
| Free water KO o separadores de producción | Horizontal |
| Flare KO | Horizontal |
| KO en la succión de un compresor | Vertical |
| Separador líquido-vapor de entrada en una estación de flujo | Horizontal |
| Separador del efluente de un reactor (mezcla líquido-vapor) | Vertical |

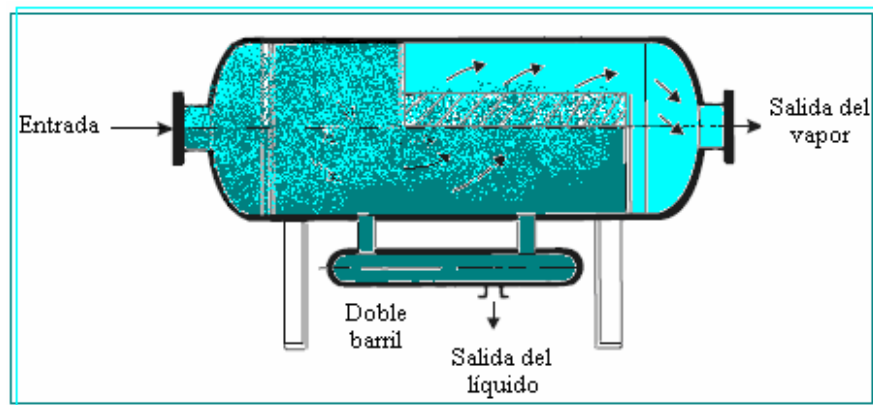
Fuente: Elaboración propia.

II.1.5.3 Separadores de dos barriles

Según Arnold (1999), los separadores de dos barriles suelen ser un poco más pequeños que los separadores convencionales de posición horizontal equivalentes (ver figura 5), en los que el tamaño de la cámara de recolección inferior vendrá dado por la capacidad de suministro del líquido que se necesite

según se requiera.

Estos separadores tampoco son muy utilizados en la industria petrolera, debido a que la diferencia de beneficios con respecto a los separadores horizontales convencionales no justifica los costos adicionales.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Esquema de un separador de dos barriles.

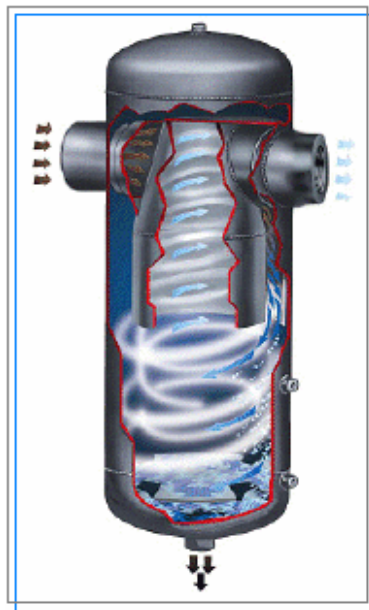
II.1.5.4 Separadores centrífugos

Un separador centrífugo es, según Martínez (2004), un separador cuyo fin es disgregar las diferentes fases (vapor, petróleo, agua y/o arena) en la corriente de alimentación, mediante el uso de fuerzas centrífugas o vórtices; el cual trabaja con un mecanismo patentado, cuyo diseño y aplicación dependerá del fabricante. Generalmente poseen un dispositivo cónico central y la alimentación ingresa de forma tangencial en el recipiente.

Los separadores ciclónicos trabajan bajo el principio de que la separación de

partículas puede ser intensificada por la imposición de una **fuerza centrífuga**. El principio básico del patrón de flujo involucra un vórtice doble (tal y como se puede observar en la figura 6), con el vapor moviéndose en espiral hacia arriba y el líquido se desliza cayendo por las paredes del dispositivo.

La velocidad espiral en el separador, puede superar varias veces la velocidad de entrada y los patrones de flujo son tales que las velocidades radiales son direccionadas hacia las paredes, haciendo que las partículas líquidas choquen contra las mismas y caigan al fondo de la unidad.



Fuente: Factory Direct Pipeline Products, Inc. (2005).

Figura 6. Esquema de un separador ciclónico.

Este tipo de separadores definen la nueva tecnología en separación mecánica, la cual aún se encuentra en período de desarrollo. Principalmente se diferencian de

los separadores cilíndricos convencionales, en que la fuerza motriz en la que se basa la separación es la fuerza centrífuga, generada por la acción giratoria de la corriente de alimentación, lo que produce la disgregación de las partículas sólidas o líquidas que pueden encontrarse en la corriente de vapor.

El auge de esta “nueva tecnología” se debe a que un separador ciclónico puede manejar velocidades más elevadas, y en consecuencia el recipiente tendrá menores dimensiones y menos peso, en comparación con un separador convencional, razón por la cual este nuevo tipo de separadores puede ser muy beneficioso en instalaciones con restricciones de espacio o peso, como por ejemplo, en plataformas costa afuera, además de resultar atractivo económicamente.

Generalmente son utilizados para la recuperación de glicol, utilizado en los procesos de deshidratación del gas. Las principales ventajas y desventajas se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Principales ventajas y desventajas de los separadores centrífugos.

| Ventajas | Desventajas |
|--|--|
| Mayores eficiencias de separación Son autolimpiantes Pueden manejar altos caudales | Mayores caídas de presión Limitaciones por costos |

Fuente: Elaboración propia.

Los separadores ciclónicos, no suelen utilizarse en operaciones de producción, debido a que son muy sensibles a cambios en la razón de flujo y tienen caídas de presión superiores a los separadores convencionales.

II.1.6 Dispositivos internos del separador

Con el propósito de optimizar el proceso de separación, minimizar problemas de operación aguas abajo de los separadores, prevenir el arrastre de líquidos, y mejorar la eficiencia de los equipos, se incluyen dentro del recipiente diversos dispositivos, denominados genéricamente como **internos**, entre los cuales se encuentran:

II.1.6.1 Dispositivos de entrada

Los internos de entrada, se colocan en el separador para inducir el cambio de *momentum* de la corriente de alimentación o para conseguir una distribución más uniforme de las fases y disipar así, la energía cinética del fluido que entra al recipiente, antes de que el mismo alcance la sección de asentamiento en el separador.

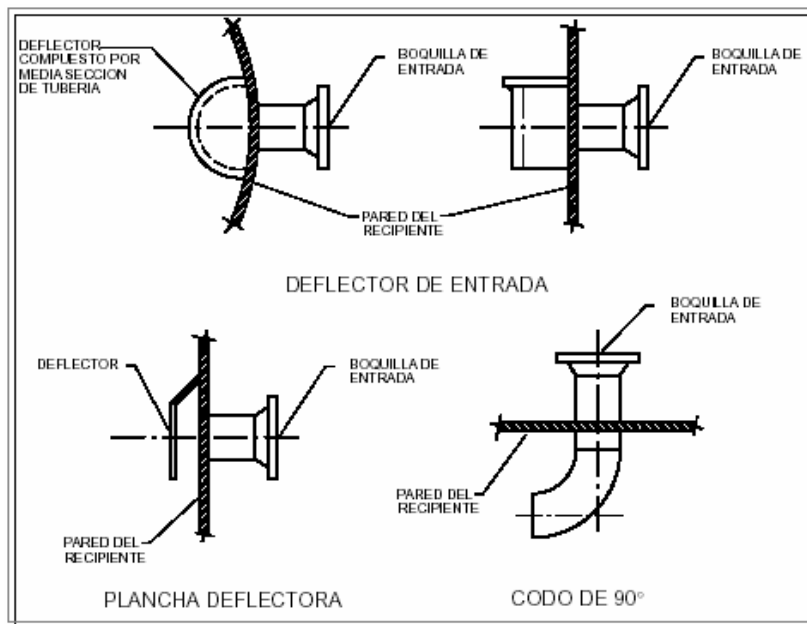
Este tipo de internos se pueden clasificar en:

a) Placas deflectoras

Estos internos de choque, comúnmente denominados por su nombre en inglés como *baffles*, se colocan después de la boquilla de entrada para que se produzca el encuentro del fluido que alimenta a la unidad con una

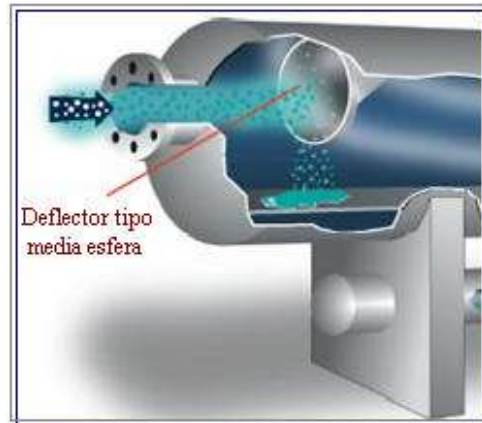
superficie, y ocurra el cambio de dirección de la mezcla, produciéndose así la variación del *momentum* de las fases.

Hay diversas geometrías para la construcción de las placas deflectoras, pueden ser de forma cónica, en codo de 90°, como media esfera, placas planas o placa con ángulo (como se puede observar en las figuras 7 y 8); de tal manera que se produzca el cambio violento en la dirección y la velocidad de los fluidos alimentados, y se produzca la separación inicial entre el vapor y el líquido.



Fuente: PDVSA (1995a).

Figura 7. Diversas configuraciones de las placas deflectoras.



Fuente: http://www.peerlessmfg.com/pdf/care_13vane_sep.pdf

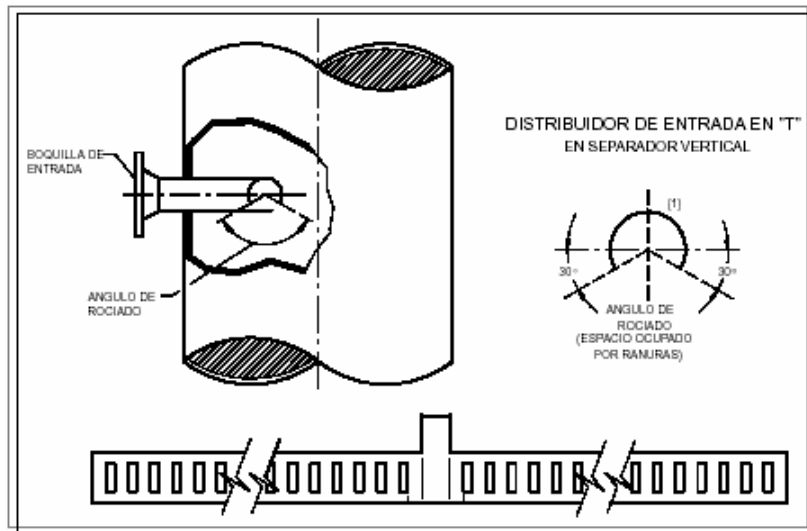
Figura 8. Deflector de entrada tipo media esfera.

Tal y como lo exponen Arnold (1999) y PDVSA (1995a), el diseño de las placas deflectoras, depende principalmente de los soportes estructurales requeridos para resistir la carga de impacto a la cual serán sometidas. Las placas deflectoras en forma de cono o semiesfera, son más ventajosas, debido a que estas configuraciones crean menores perturbaciones que las placas planas o con ángulos, minimizando así el reatrapamiento o los problemas de formación de emulsiones.

b) Distribuidores de flujo

En esta categoría se pueden incluir varios dispositivos, tales como: la tubería partida (es una tubería a la que se le han hecho abierto unos orificios o ranuras laterales para producir el esparcimiento de las fases), los difusores en forma de Y o T con los cuales se desea conseguir desviar el flujo hacia las paredes del recipiente, y los distribuidores patentados, los cuales distribuyen

los fluidos generando patrones organizados dentro del separador.



Fuente: PDVSA (1995 b).

Figura 9. Distribuidor de entrada en forma de “T” en un separador vertical.

c) Ciclones de entrada

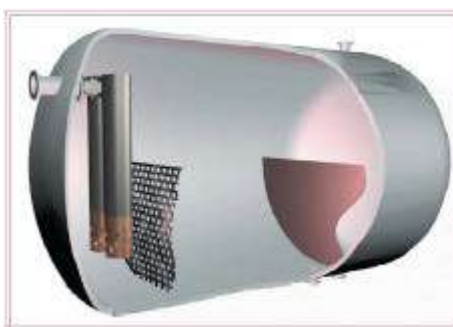
Los deflectores de entrada de tipo ciclónico, utilizan la fuerza centrífuga para separar la mezcla líquido vapor. En la mayoría de estos internos, la alimentación se introduce tangencialmente y posee un conducto ciclónico o varias chimeneas (como en el caso de los tubos vórtices), que obliga al fluido a correr rápidamente por las paredes del dispositivo.

Aunque los ciclones de entrada producen una gran caída de presión ofrecen las siguientes ventajas:

- Contribuyen en la prevención de formación de espumas.
- Reducen el tamaño y el peso de equipos nuevos.

- Se pueden tener menores tiempos de residencia con igual eficiencia.
- Son de fácil instalación.

El diseño de este tipo de internos depende de la patente de cada fabricante aunque generalmente poseen una configuración parecida al mostrado en la figura 10.



Fuente: Aker Kværner (1997).

Figura 10. Dispositivo ciclónico de entrada.

II.1.6.2 Eliminadores de neblina

Los eliminadores de neblina o **extractores de niebla**⁴, son accesorios utilizados para hacer coalescer las partículas líquidas de tamaño pequeño, que no son separadas por la acción de la gravedad.

Todos los eliminadores de neblina funcionan, de manera tal que intervienen en el balance natural de las fuerzas sobre la partícula; al reducir la velocidad del vapor, introduciendo fuerzas adicionales (como por ejemplo la fuerza

⁴ A este tipo de internos, se les conoce comúnmente bajo el nombre de **demister**; el uso la palabra demister para denominar a este tipo de internos, no es totalmente correcta, debido a que Demister® es una marca registrada por Koch-Glitsch, LP.

centrífuga) o aumentar el efecto de la fuerza gravitacional incrementando el peso de la partícula al hacer crecer su diámetro.

Los eliminadores de neblina pueden ser de forma rectangular o cilíndrica y ser colocados en posición horizontal o vertical, en las distintas configuraciones de los separadores (ver figura 25 en el apéndice B).

Si bien los criterios de diseño dictarán las pautas para ciertos valores, se debe dimensionar el separador con un espacio mínimo de 12 pulgadas de *disengaging height* (altura por encima del dispositivo hasta la tangente superior), y de 6 a 18 pulgadas desde la boquilla de entrada al separador hasta la cara de choque del eliminador.

Entre los principales tipos de extractores de niebla se pueden enumerar:

a) Mallas

Son los extractores de niebla más comunes. Una malla, consiste en una almohadilla tejida que impide el paso de partículas de cierto tamaño hacia la parte superior del separador, las cuales quedan aglomeradas en las fibras del dispositivo hasta adquirir el tamaño suficiente, de tal manera, que el peso de la partícula supere la fuerza de arrastre producida por el vapor (que fluye a través de la malla) y la tensión superficial⁵ de la partícula, permitiendo que ésta pueda caer a la sección de recolección del líquido (ver figura 11). La

⁵ La **tensión superficial** de un fluido, es la fuerza que se opone al aumento del área del mismo (Castellan, 1998, p.433)

parte tejida de la malla, debe ser suficientemente firme para crear un puente entre los soportes del eliminador y al mismo tiempo tener bastante espacio libre para permitir el flujo de vapor a través de ella.

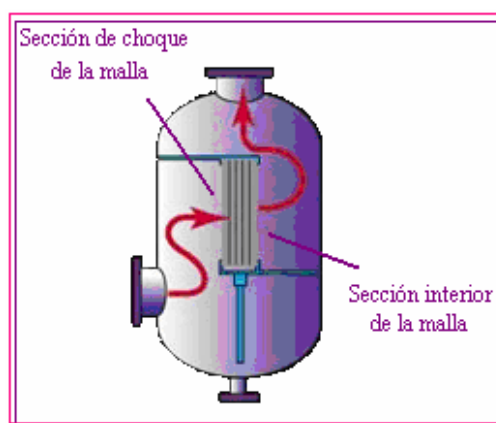


Fuente: Amisco Separation Products, Inc. (2004).

Figura 11. Eliminador de neblina tipo malla de configuración cilíndrica.

Según Fabian, et al., (1993), cuando el flujo a través de la malla es horizontal, el fabricante debe tener especial cuidado en el diseño del eliminador, ya que las partículas líquidas capturadas en la parte más alta de la malla, podrían drenar con un determinado ángulo, desde la sección de choque de la malla hacia la parte interior de la misma (ver figura 12), mientras avanzan arrastradas por el flujo de vapor, como consecuencia de la fuerza resultante entre la atracción gravitacional (en dirección vertical) y la fuerza de arrastre de vapor sobre la partícula (en dirección horizontal). De esta manera, la malla puede resultar inundada en la cara interna a la sección de coalescencia, disminuyendo el área libre de la misma, lo que trae como consecuencia el atrapamiento de líquido en el vapor. Sin embargo, Martínez (2004) considera, que el diseño correcto de una malla con orientación vertical (equivalente al flujo de vapor horizontal a través de la misma), permite ganar espacio y aumentar la eficiencia de la separación. De la misma

manera, Calvert, 1972 citado por Perry, et al., (1999b) experimentó con mallas horizontales y verticales, encontrando mejor drenaje en las mallas verticales con flujo horizontal, además de que permiten mayores velocidades del vapor a través de ellas sin que se produzca reatrapamiento (14-89).



Fuente: Elaboración propia a partir de la figura de ACS Separations & Mass-Transfer Products.

Figura 12. Sección anterior y posterior de un eliminador de neblina tipo malla.

Sobre las desventajas de este tipo de eliminadores, PDVSA (1995a) expone principalmente el hecho de que el vapor es forzado a fluir a través de los mismos canales por los cuales se drenan las partículas líquidas. Este flujo en sentidos contrarios puede traer como consecuencia la inundación de la malla, en caso de que el líquido se acumule al no poder descender, lo que se traduce en la restricción del flujo de vapor.

Además, este tipo de dispositivos pueden fracturarse si la presión en la unidad disminuye violentamente y son más propensos a quedar obstruidos por la deposición de sólidos como asfaltenos, parafinas, arenas, etc. Las principales ventajas de los eliminadores de neblina tipo malla son:

- Bajos costos de instalación.
- Altas eficiencias de remoción de sólidos, las cuales dependerán del tipo de tejido y del espesor de la malla.
- Bajas caídas de presión
- Poseen grandes áreas superficiales y volúmenes vacíos.

El diseño de estos internos depende del fabricante y pueden ser clasificadas según la densidad de la almohadilla, el diámetro del alambre o el tipo de tejido de la malla (ver figura 12 y 13).



Fuente: Amistco Separation Products, Inc. (2004).

Figura 13. Tipo de tejido de alambre metálico típico de un eliminador de neblina tipo malla.



Fuente: Amistco Separation Products, Inc. (2004).

Figura 14. Eliminador de neblina tipo malla co-tejida que incluye filamentos de fibra de vidrio.

En el artículo publicado por Fabian, et al., (1993) titulado “*Demystifying the selection of mist eliminators*”, los autores exponen que las mallas son los

eliminadores de neblina más utilizados y que poseen ciertas características generalizadas tales como se enumeran en la siguiente tabla.

Tabla 3. Características generales de los eliminadores de neblina tipo malla.

| Características de la malla | |
|---|--|
| Espesor (<i>Casos Especiales</i>) | 3 - 7 in (12 in) |
| Densidad | 5 a 12 lb/ft ³ |
| Material | Acero inoxidable, níquel, cobre, aluminio, acero al carbono, aluminio, polietileno, etc. |
| Caída de presión | < 1 in de H ₂ O |
| Porcentaje del flujo de diseño del separador para el cual la malla funciona correctamente | 30 – 110 % |
| Diámetro de los alambres | 0,004 - 0,011 in |
| Diámetro de la malla | Puede ser inferior al diámetro del separador |
| Porcentaje de volumen vacío | 95 – 99 % |
| Eficiencia según el máximo diámetro de partícula a separar | 99% de partículas = 10 µm |

Fuente: Elaboración propia a partir de los valores expuestos por Fabian, et al., (1993).

Aunque la eficiencia de las mallas depende de la distribución de los tamaños de las partículas, en casos de mallas de muy altas eficiencias, que han sido especificadas correctamente, estas pueden llegar a tener eficiencias como la presentada en la tabla anterior (Arnold, 1999).

Estos valores varían dependiendo del fabricante; sin embargo, la experiencia ha demostrado que la distribución de tamaños de las partículas líquidas, dependerá de la velocidad de flujo de alimentación a la unidad, del número de restricciones y de la caída de presión en la tubería de entrada.

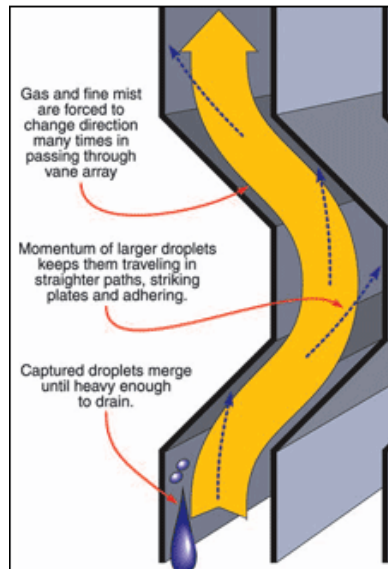
b) *Vanes*

Los eliminadores de neblina tipo *vanes*, o **venas** en español, están formados por un laberinto constituido por láminas de metal colocadas paralelamente, que pueden tener una serie de bolsillos (simples o dobles) para recolectar las partículas líquidas coalescidas.

A través de los canales, la trayectoria del vapor es sometida a cambios periódicos (ver figura 14), mientras que las partículas líquidas, tienden a seguir en línea recta y son atrapadas en los bolsillos del eliminador, donde coalescen y caen a la sección de recolección del recipiente⁶.

Este tipo de eliminador es más utilizado cuando el líquido contiene partículas sólidas cuando existen altas cargas de líquido en la mezcla o cuando se tienen líquidos más viscosos.

⁶ Para evitar el rearrastre, en algunos eliminadores tipo *vanes* suele colocarse un colector o tubo de drenaje para guiar el líquido recolectado a fluir hacia el sumidero del separador sin que partículas del mismo queden atrapadas en el vapor que asciende, y sean arrastradas nuevamente hacia la salida por el tope del separador.



Fuente: Amistco Separation Products, Inc. (2004).

Figura 15. Esquema de la captura de las partículas en un arreglo de *vanes* con flujo vertical.

La desventaja de estos dispositivos es su elevado costo, mientras que las principales ventajas son: las altas eficiencias y la durabilidad, ya que al ser construidos en forma compacta no tienden a desarmarse o partirse. La eficiencia de los *vanes* (también denominados **aletas**), es mayor a la eficiencia ofrecida por las mallas, debido a que el líquido recolectado es drenado perpendicularmente al flujo de vapor, tal y como lo describe PDVSA (1995a).

La eficiencia del extractor, depende de la configuración de las aletas, el espaciamiento entre las láminas, y el ancho y la profundidad de los bolsillos recolectores. Aún así, cuando la mezcla posee una gran cantidad de partículas líquidas muy pequeñas (menores a 10 micrones), su eficiencia

disminuye rápidamente. Además este tipo de eliminadores tolera mayores velocidades de vapor que las mallas. Entre las principales características de los eliminadores de neblina tipo *vanes* se pueden encontrar:

Tabla 4. Principales características de los eliminadores de neblina tipo *vanes*.

| Características de los <i>vanes</i> | |
|--|----------------------------------|
| Distancia entre placas | 0,2 - 3 in |
| Profundidad del <i>vane</i> en la dirección del flujo | 6 – 12 in |
| Régimen de flujo de vapor entre las láminas | Laminar |
| Caída de presión | 0,4 – 0,6 in de H ₂ O |
| Máximo diámetro de partícula a separar por un <i>vane</i> estándar | = 40 μm |
| Máximo diámetro de partícula a separar por un <i>vane</i> de alta eficiencia | = 15 μm |

Fuente: Elaboración propia a partir de los valores expuestos por Fabian, et al., (1993).

El diseño y el funcionamiento de este tipo de dispositivos dependerán además del diseño por parte del fabricante de la temperatura y la presión de operación, de la cantidad de líquido atrapado, de la presencia de sólidos, del tamaño de las partículas a recolectar y de las propiedades físicas tanto de la fase líquida, como de la fase vapor. Este tipo de internos debería ser tomando en consideración, cuando la presión de operación del separador está por encima de los 300 psig y más de 4 pies de diámetro, según TECHNIP (2000).

c) Centrifugos

Son dispositivos que permiten la separación de las partículas líquidas por

medio de fuerzas centrífugas. Son más eficientes y menos susceptibles a taponamientos que las mallas y las *vanes*, pero no son muy utilizados en estaciones de flujo para operaciones de producción, debido a que las eficiencias de remoción son susceptibles a pequeñas variaciones en los flujos y producen grandes caídas de presión, según PDVSA (1995a). Además, cuando las velocidades son muy altas, se pueden producir desgastes y abrasiones obligando a cambiar el dispositivo frecuentemente, lo que resulta costoso. Pueden utilizarse las *vanes* estacionarias, los ciclones, o los multiciclones.

Algunas de las principales características de los eliminadores de neblina centrífugos se exponen en la siguiente tabla.

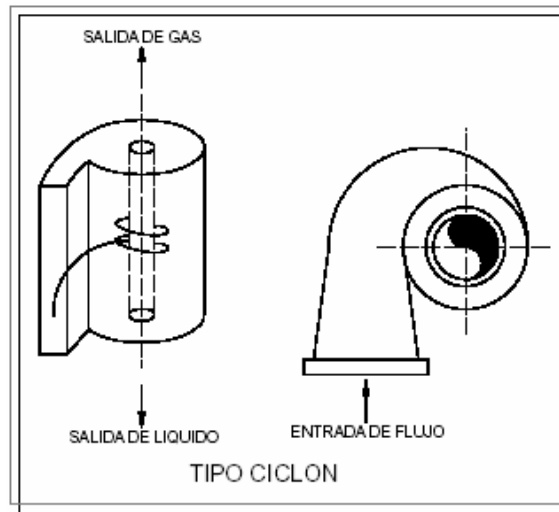
Tabla 5. Principales características de los eliminadores de neblina centrífugos.

| Características de los eliminadores centrífugos | |
|---|----------------------------|
| Diámetro de los tubos vórtices | 2 in |
| Eficiencia en la retención de partículas = 2 μm | 85 % |
| Eficiencia en la retención de partículas = 8 μm | 99 % |
| Caída de presión | 140 in de H ₂ O |

Fuente: Elaboración propia a partir de los valores expuestos por PDVSA (1991).

Este tipo de dispositivos, según TECHNIP (2000), debe ser utilizado cuando la presión de operación del separador sobrepasa los 1000 psig, en recipientes de más de 4 pies de diámetros. En estos, el vapor girará en torno al eje del

cilindro y saldrá por la parte superior, mientras que el líquido caerá al fondo por la fuerza centrífuga que lo separará debido a la diferencia de densidades que existe entre ambas fases (ver figura 15).



Fuente: PDVSA (1995a).

Figura 16. Eliminador de neblina tipo ciclón.

Son generalmente utilizados, cuando las diferencias de densidades entre las fases que componen la mezcla son muy pequeñas y cuando el flujo de vapor es mucho mayor que el del líquido. El diseño de los multiciclones incluye varios tubos centrífugos en paralelo, para obtener altas velocidades y eliminar así partículas muy pequeñas.

d) Lechos de fibra

Aunque este tipo de eliminadores de neblina es raramente utilizado en separadores líquido-vapor, los lechos de fibra son extractores que operan de la misma manera que los eliminadores tipo malla, pero que son utilizados

sólo cuando se requiere una eficiencia muy alta con respecto al arrastre de líquidos, debido a que sus altos costos y sus elevadas caídas de presión, los hacen poco viables.

A través de este tipo de eliminadores, el flujo de la mezcla líquido-vapor es horizontal y a co-corriente, y el área superficial de estos eliminadores puede llegar a ser entre 3 y 150 veces el área de una malla de igual volumen (Fabian, et al, 1993).

El espesor de los lechos de fibra según Perry (1999b) varía de 1 a 3 in, aunque pueden llegar a tener un espesor mayor. De la misma manera que los demás tipos de eliminadores de neblina, su funcionamiento se ve afectado por las propiedades físicas de las partículas líquidas, el flujo de vapor, la temperatura, la presión, el tamaño de la partícula líquida y la cantidad de líquido atrapada. Entre las principales características de los eliminadores de neblina de lecho de fibra se encuentran:

Tabla 6. Principales características de los eliminadores de neblina tipo lechos de fibra.

| Característica de los lechos de fibra | |
|--|---|
| Material | Fibra de vidrio o fibras de polipropileno |
| Diámetro de partícula a ser retenido | 0,1 - 3 μm |
| Eficiencia en la retención del líquido | 99,97% |
| Caída de presión | 2 - 20 in de H ₂ O |
| Diámetro de las fibras | < 0,001 in |

Fuente: Elaboración propia a partir de los valores expuestos por Ludwig (2001).

II.1.6.3 Rompe vórtices

Un vórtice es un remolino, en el cual los fluidos adquieren un movimiento rotacional creando un embudo en el fondo del recipiente, por el cual puede escapar el vapor cuando se abre la válvula de control del líquido.

Por esta razón, en los separadores líquido-vapor, suelen instalarse dispositivos que evitan la formación de vórtices y sus indeseables consecuencias.

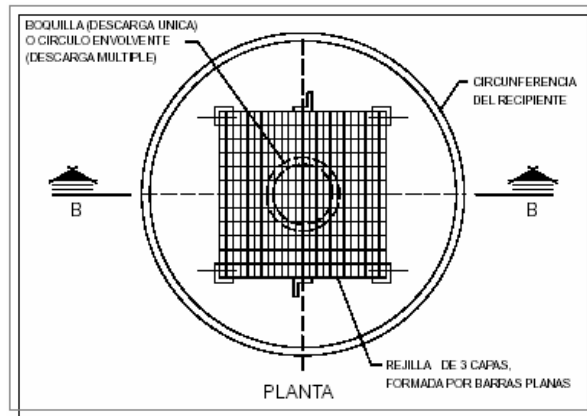
Tal y como son descritos en el PDVSA (1995b), existen dos tipos de rompe vórtices:

a) Rejillas rompe vórtices

Los rompe vórtices tipo rejilla, están compuestos por un trío de placas cuadradas colocadas en posición horizontal y de forma tal que su centro esté alineado con la boquilla de salida del líquido (figura 17).

En 1998, Estopiñan, citado por Zabala (2005) dijo que: “cada una de éstas placas consiste en un grupo de barras entrecruzadas y que se encuentran espaciadas uniformemente” (p. 25).

Este tipo de rompe vórtice tiene la ventaja de ser el más efectivo; sin embargo, es más costoso que la placa, pero su colocación se justifica cuando hay múltiples salidas de líquido o cuando la boquilla de salida es muy grande y el uso de la placa es complejo.

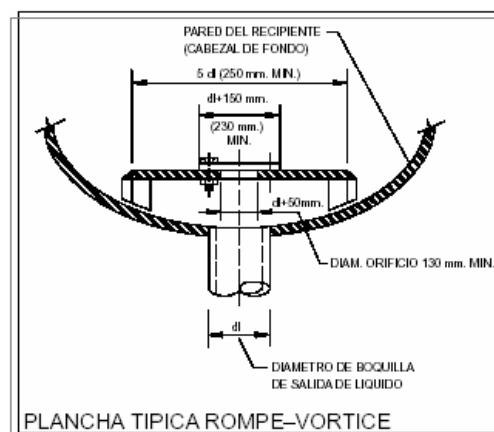


Fuente: PDVSA (1995b).

Figura 17. Rejillas rompe vórtices.

b) Placas rompe vórtices

Las placas rompe vórtices son circulares y se colocan en posición horizontal sobre la boquilla de salida del líquido, como se muestra en la figura 18. Este tipo de rompe vórtice es más económico pero puede ser una solución poco práctica, cuando el diámetro de la boquilla de salida del líquido es el 15% del diámetro del separador o mayor, o cuando se tienen múltiples salidas de líquido, casos en los que el uso de la rejilla es más adecuado.



Fuente: PDVSA (1995b).

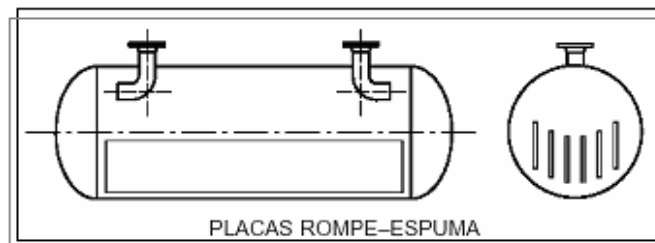
Figura 18. Placas rompe vórtices.

II.1.6.4 Placas rompe espuma

En los separadores líquido-vapor, suelen instalarse dispositivos que evitan la formación de espumas y sus indeseables consecuencias. Tal y como expone el PDVSA (1995b), existen varias soluciones para evitar este problema como:

a) Placas rompe espuma

Una de las soluciones más efectivas es colocar “una serie de placas paralelas longitudinales direccionadoras del flujo... en la zona de retención de líquidos” (PDVSA, 1995a, p. 14) para forzar a la espuma a pasar entre ellas, de forma tal de ayudar a la coalescencia (figura 19). Con estas placas se evita que el vapor en forma de burbujas ascienda a través del líquido y se forme la espuma.



Fuente: PDVSA (1995a).

Figura 19. Placas rompe espuma.

b) Adición de químicos

Una solución para la disminución de la formación de espuma es agregar aditivos químicos a la mezcla de entrada, esta solución aumenta la capacidad del separador, pero no debe tomarse en cuenta un tipo de aditivo específico,

en el diseño del recipiente, ya que las características de la mezcla y de la espuma pueden variar con el tiempo y aumentarán el costo de la unidad.

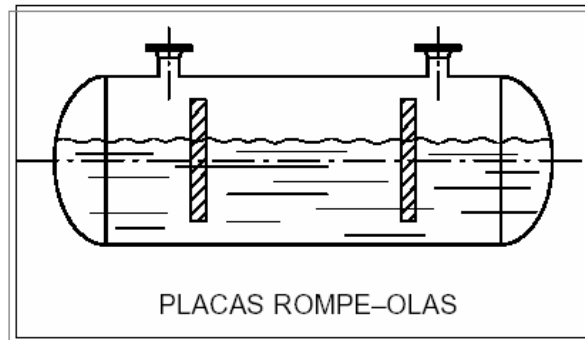
Es importante resaltar que el uso de aditivos químicos, es frecuentemente utilizado como solución, ya que aún cuando éstos son costosos, permiten mayores capacidades de flujo que las especificadas en el diseño del recipiente.

c) Otras soluciones

Pueden buscarse soluciones más específicas y efectivas, como por ejemplo, se puede diseñar el recipiente más largo y aumentar la presión, teniendo en cuenta que la construcción de separadores más grandes, es menos costoso a presiones elevadas.

II.1.6.5 Placas rompe olas

Cuando se diseñan separadores en posición horizontal que tienen grandes longitudes, suele darse el flujo de avance u oleaje en la sección de recolección del líquido. Para evitar la propagación de olas o cambios en la dirección longitudinal debido a la entrada de *slugs* en los separadores, se colocan placas en sentido perpendicular al flujo, es decir, en posición transversal a la unidad tal y como se muestra en la figura 20, las cuales son beneficiosas en el control de nivel.



Fuente: PDVSA (1995a).

Figura 20. Placas rompe olas.

II.1.7 Problemas operacionales que pueden presentarse en los separadores

Los principales problemas operacionales que se pueden presentar en los separadores mecánicos, según lo expuesto por Arnold (1999) y PDVSA (1991), son:

II.1.7.1 Arrastre de líquidos (*carryover*)

El arrastre de líquidos, conocido también por su nombre en inglés “*carryover*”, está definido como la “dispersión fina o neblina de líquido... que empieza a ser arrastrada hacia el nivel superior. Esto es causado por una excesiva velocidad del vapor” (Martínez, 2004).

El *carryover*, ocurre cuando partículas líquidas escapan con el vapor en la salida, y puede ser un indicador de alto nivel de líquido, daño en los dispositivos internos del recipiente, espumas, diseño incorrecto, taponamiento en la salida, o que la rata de flujo de operación excede la rata de diseño (Arnold, 1999). Sobre las causas del arrastre de líquidos en el tope del separador,

Martínez (2004) expone principalmente tres razones a considerar:

- La incapacidad del recipiente para manejar la cantidad de líquido que se introduce, situación que sobrepasará el nivel del líquido permitido y en consecuencia el tiempo de residencia del vapor será insuficiente para separarse del líquido, quedando éste último atrapado en la corriente de salida del vapor y fluyendo hacia la parte superior de la unidad.
- Cuando el caudal de alimentación es mayor al calculado como valor de diseño, aumentará la velocidad del vapor dentro del recipiente y generará el *carryover* de la fase líquida, hacia el tope del separador.
- El aumento de la velocidad del vapor también puede ser una consecuencia de un aumento de la presión de operación (manteniendo constante el caudal de diseño), lo que producirá el arrastre de líquido en la corriente de vapor, además de que en algunos casos puede traer como resultado que el eliminador de neblina se fracture.

Aún cuando el valor permitido para el arrastre de líquidos, varía según las exigencias del proceso, según el GPSA (1998) el arrastre en los separadores debe ser menor a 0,1 galones de líquido por cada millón de pies cúbico de gas (a condiciones estándar), en la salida del recipiente. Las soluciones para aminorar el arrastre de líquidos, serán expuestas y desarrolladas posteriormente.

II.1.7.2 Arrastre de vapor (*carryunder*)

El arrastre de vapor en la salida del líquido, ocurre cuando burbujas de vapor

escapan con la fase líquida recolectada en el sumidero, y puede ser debido a un nivel bajo de líquido, vórtices o una falla en el control de nivel del recipiente (Arnold, 1999). Para evitar esto, se colocan rompe vórtices en el fondo de la unidad, debido a que un arrastre de vapor por la boquilla de salida del líquido puede afectar el proceso aguas abajo del separador.

II.1.7.3 Formación de espuma

La tendencia a formar espuma de una mezcla líquido-vapor, afecta severamente el desempeño del separador; ya que cuando el nivel de la espuma sobrepasa la altura de la boquilla de entrada, el vapor que se introduce como alimentación, impulsará la fase espumosa hacia la parte superior del separador, produciendo un arrastre de líquido severo en la línea de vapor.

Sobre la razón para la formación de espuma, Arnold (1999) indica, que la aparición de impurezas, distintas al agua, es la principal causa, debido a que estas son difíciles de remover antes de que la corriente se introduzca en el separador. Según el mismo autor, los principales problemas producidos por la espuma son:

- Afecta el control mecánico del nivel del líquido, debido a que los dispositivos de control deberán manejar tres fases en vez de dos.
- La espuma ocupa mucho espacio en el recipiente, debido a que tiene una alta relación volumen-peso, esto reduce el espacio disponible para la recolección del líquido o la sección libre para el asentamiento por gravedad.

- Cuando la espuma se hace incontrolable, se hace imposible lograr una separación líquido-vapor sin que ocurra arrastre de vapor en la salida de líquido o arrastre de líquido en la salida del vapor.

El diseño adecuado de un separador, según PDVSA (1991), se debe considerar el uso de una superficie coalescedora y el tiempo suficiente para que la espuma se rompa antes de que sobrepase la altura de la boquilla de entrada, con el fin de evitar que la espuma sea un problema grave. Además, si se conoce con anterioridad la tendencia de la mezcla a formar espuma, uno de los métodos más económicos para eliminar este problema, es la instalación de placas deflectoras de espuma.

Con respecto a la cantidad de espuma que se pueda esperar, Arnold (1999) advierte que dependerá tanto de la caída de presión a la que sea sometido el líquido como a las características del mismo a las condiciones del separador, y que en algunos casos particulares, el efecto de la temperatura puede ser significativo.

II.1.7.4 Taponamiento del eliminador de neblina

El taponamiento de los eliminadores de neblina, trae como consecuencia la formación de caminos preferenciales y la reducción del área libre para que el vapor fluya a través del mismo, situación que resulta en una mayor caída de presión del vapor a través del eliminador, y que en algunos casos, puede incluso

conducir a una fractura del eliminador de neblina. Frecuentemente, el taponamiento de los también llamados extractores de neblina, se debe al incrustamiento de coque, productos de corrosión de las fibras del eliminador, materiales pegajosos (asfaltenos y parafinas) o sólidos, tales como:

a) Asfaltenos

Los asfaltenos del petróleo, son una familia de compuestos hidrocarburos que presentan un comportamiento global característico y que exhiben estructuras moleculares complejas, las cuales están formadas principalmente por azufre, nitrógeno y oxígeno y otros elementos que se encuentran en menores proporciones.

Los asfaltenos son compuestos que quedan como fracción insoluble luego de tratar una mezcla bajo determinadas condiciones (como por ejemplo el residuo de la destilación al vacío); la composición de estas fracciones varía dependiendo del tipo de petróleo. Estos son sólidos que pueden ocasionar el taponamiento de los extractores de niebla, sobre todo en los eliminadores tipo malla trayendo como consecuencia el taponamiento del mismo.

b) Parafinas

Algunos separadores pueden verse afectados por la acumulación de **parafinas** en los eliminadores de neblina tipo malla, los cuales son propensos a ensuciarse y en algunos casos a taparse. Una de las soluciones

más frecuentes, es el uso de eliminadores de neblina tipo ciclón; además, las bocas de visita y boquillas deben permitir la introducción de vapor, solventes y otros tipos de limpiadores de internos al separador (Arnold, 1999).

c) Sólidos

Las **arenas** o sólidos son un problema en los separadores, debido a que producen taponamientos de los internos y acumulación en el fondo del separador. Este problema puede ser disminuido mediante el uso de drenajes, boquillas de limpieza por inyección de líquidos, boquillas de remoción de sólidos y inclinación de recipientes horizontales, y construcción de los mismos con materiales resistentes a la corrosión, entre otros (PDVSA, 1995a).

Unos de los principales problemas ocasionados debido a las fallas en los eliminadores de neblina, por taponamiento, es que si estos internos se fracturan, partes de los mismos se desprenderán y pueden llegar restos de ellos a otros equipos aguas abajo, causando daños indeseables a los mismos.

Además, sobre las fallas en los eliminadores de neblina, Lieberman, et al. (2002) explica, que estas promueven caminos preferenciales con velocidades altas, en las partes del extractor que no están obstruidas, lo cual puede resultar en un reatrapamiento de líquido, y significar un arrastre mayor al que se hubiese producido si no se colocara un eliminador de neblina.

II.1.7.5 Flujo de avance

Se denomina flujo de avance al tipo de flujo inestable o de oleaje que se da como consecuencia de los *slugs* de líquido que entran a la unidad, o como consecuencia de una distancia muy larga sin ningún tipo de dispositivo de choque en un separador horizontal.

II.1.7.6 Bajas temperaturas

Según el PDVSA (1991) esta condición no se produce muy a menudo. En estos casos, las bajas temperaturas, de la misma manera que las altas presiones, pueden ocasionar la formación de hidratos de gas, ya que, como se sabe, el gas natural o el gas asociado, contienen vapor de agua que puede condensarse y formar hidratos. Para solucionar este problema se debe aplicar calentamiento de forma de que no se produzca la condensación.

II.2 Bases teóricas

Cuando se desea dimensionar un separador líquido-vapor, la velocidad máxima que podrán alcanzar las partículas líquidas, es el parámetro principal a calcular por el ingeniero que pretende realizar dicho diseño, de manera que éstas puedan ser separadas de la fase vapor sin que ocurra el *carryover*.

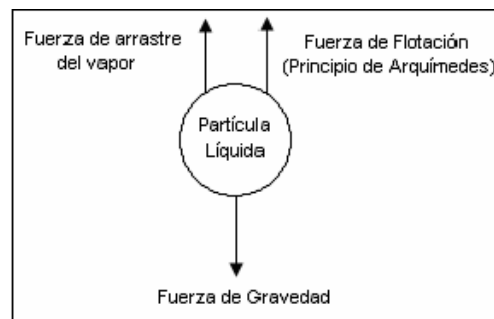
Para ello, es necesario estudiar el comportamiento de dichas partículas cuando caen a través del vapor dentro del separador y los fenómenos que determinan que esto suceda.

II.2.1 Teoría de asentamiento

Cuando existe un movimiento relativo entre una partícula y un fluido circundante, el fluido ejercerá una fuerza de arrastre sobre la partícula que cae bajo la influencia de la gravedad; la partícula acelerará hasta que se produzca el equilibrio entre las fuerzas que actúan sobre ella. A partir de ese momento, su aceleración será nula y la partícula caerá a una velocidad constante, conocida como la **velocidad terminal** de la partícula.

Para analizar el movimiento de las partículas líquidas atrapadas en la corriente de vapor en un separador, se comenzará por hacer las siguientes suposiciones:

- Las partículas en estudio son esferas sólidas y rígidas.
- Se estudia una sola partícula.
- Se estudian las tres fuerzas que actúan sobre la partícula, tal y como puede observarse en la figura 21.
- Se estudia el comportamiento de partículas líquidas en separadores verticales, en los que el vapor fluye verticalmente, contrario al flujo de líquido, el cual cae en la dirección de la gravedad.



Fuente: Zabala (2005).

Figura 21. Diagrama de fuerzas que actúan sobre una partícula líquida en una corriente de vapor.

a) Fuerza de arrastre

La *fuerza de arrastre* ejercida sobre la partícula esférica por el flujo de vapor, en dirección opuesta a la velocidad de dicha partícula, está dada por la ecuación general, derivada por Sir. Isaac Newton, la cual en resumen expresa que la esfera debe desplazar un volumen de gas igual al área proyectada por la esfera en la dirección del movimiento del fluido y viene expresada según Perry (1999a) como:

$$F_D = \frac{\rho_v \cdot v_t^2 \cdot C_D \cdot A_P}{2} \quad \text{Ec. 1}$$

b) Fuerza de flotación

La *fuerza de flotación* que experimenta la partícula, se debe al Principio de Flotación de Arquímedes, que afirma que “todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical y hacia arriba igual al peso de fluido desalojado” (García, 2005), y está dada por:

$$F_B = \rho_v \cdot g \cdot V_P \quad \text{Ec. 2}$$

c) Fuerza gravitacional

La *fuerza gravitacional* que actúa sobre la partícula en dirección opuesta a la fuerza de flotación, se debe a la fuerza que ejerce la tierra sobre los cuerpos debido a la acción de la gravedad, y según Jekel, et al. (2001), está dada por:

$$F_G = \rho_L \cdot g \cdot V_P \quad \text{Ec. 3}$$

Tal y como lo expresa el autor citado en el párrafo anterior, el balance de fuerzas en la partícula puede establecerse gracias a la Ley de Newton expresada como :

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i(t) = m_p \cdot \vec{a}(t) = 0 \quad \text{Ec. 4}$$

Al sustituir las fuerzas que actúan sobre la partícula en la ecuación (4), y tomando como positiva la dirección de la fuerza de gravedad, se tiene:

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i(t) = [F_G] - [F_B] - [F_D] = 0 \quad \text{Ec. 5}$$

Sustituyendo las ecuaciones (1), (2) y (3) en la ecuación (5) se obtiene:

$$[\rho_L \cdot g \cdot V_p] - [\rho_v \cdot g \cdot V_p] - \left[\frac{\rho_v \cdot v_t^2 \cdot C_D \cdot A_p}{2} \right] = 0 \quad \text{Ec. 6}$$

Agrupando términos resulta:

$$g \cdot V_p \cdot (\rho_L - \rho_v) = \frac{\rho_v \cdot v_t^2 \cdot C_D \cdot A_p}{2} \quad \text{Ec. 7}$$

Teniendo en consideración que para el análisis del asentamiento gravitatorio de partículas líquidas en un flujo de vapor, se sup uso que dichas partículas sonesferas rígidas, el volumen de dichas partículas vendrá dado por :

$$V_p = \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{D_p}{2} \right) \cdot A_p \quad \text{Ec. 8}$$

Sustituyendo entonces la ecuación (8) en la ecuación (7) se obtiene:

$$g \cdot \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{D_p}{2} \right) \cdot A_p \cdot (\rho_L - \rho_v) = \frac{\rho_v \cdot v_t^2 \cdot C_D \cdot A_p}{2} \quad \text{Ec. 9}$$

Si se multiplica la ecuación (9) por el término $\frac{2}{A_p}$ se obtiene la siguiente

ecuación:

$$\frac{4}{3} \cdot g \cdot D_p \cdot (\rho_L - \rho_v) = \rho_v \cdot v_t^2 \cdot C_D \quad \text{Ec. 10}$$

Despejando de la ecuación (10) la velocidad terminal, resulta:

$$v_t = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot D_p \cdot (\rho_L - \rho_v)}{3 \cdot C_D \cdot \rho_v}} \quad \text{Ec. 11}$$

Sin embargo, debe acotarse, que si se requiere un estudio estricto, debería tenerse en cuenta que (al contrario de lo supuesto para el análisis desarrollado con la finalidad de obtener la ecuación que determina la velocidad terminal de las partículas líquidas a ser separadas) las partículas en el separador estarán en un ambiente más concentrado, y de tal modo no deberían ser estudiadas como si fuesen un sólo ente descendiendo, y correspondería aplicarse los conceptos para el asentamiento obstaculizado, mejor conocido como *unhindered settling*⁷.

Debido a que no existen grandes diferencias (desde el punto de vista práctico en la separación líquido-vapor) entre la velocidad terminal obtenida en la ecuación (11) a través del asentamiento gravitatorio y la corrección que se haría a dicho parámetro por el asentamiento obstaculizado, este tema no se desarrollará con mayor profundidad.

Como puede observarse en la ecuación (11), el cálculo de la velocidad terminal de las partículas líquidas, implica conocer las densidades de las fases a manejar, el

⁷ Según Perry (1999a), el asentamiento obstaculizado, es una corrección que se hace a la velocidad terminal hallada según la teoría de asentamiento gravitatorio, debido a que se toma en cuenta que no es una partícula única sino un conjunto de ellas expuestas a interacciones hidrodinámicas entre sí.

diámetro de partícula que se desea separar y el coeficiente de arrastre según el régimen en que se encuentra la mezcla en el separador.

Este último parámetro, supone que el ingeniero que diseña, conozca el régimen de flujo en el interior de la unidad, el cual viene dado por el número de **Reynolds** de la partícula, expresado como:

$$Re = \frac{D_p \cdot v_t \cdot \rho_v}{\mu_v} \quad \text{Ec. 12}$$

De esta manera, en la ecuación (12) se puede observar que el número de Reynolds, a su vez, es función de la velocidad terminal, razón por la cual el proceso habría de ser iterativo y tedioso. En adición, el número de Reynolds está definido en un rango de valores muy extenso; debido a esto, es preciso definir la velocidad terminal en cada uno de éstos regímenes y para ello se deben considerar las distintas leyes que aplican para cada régimen.

Cada una de las leyes que se estudian a continuación, están definidas para un régimen de flujo determinado, el cual aplicará para un determinado rango de valores del número de Reynolds, para los cuales se ha estudiado como varía el coeficiente de arrastre. En cada régimen de flujo se aplicará la ley correspondiente para el rango de valores del diámetro de partícula para los cuales está definido; en este sentido, para cada una de las leyes existirá un diámetro crítico de las partículas a separar el cual vendrá dado por la siguiente expresión:

$$D_{PC} = K_{CR} \cdot \left[\frac{\mu_v^2}{g \cdot \rho_v \cdot (\rho_L - \rho_v)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ec. 13}$$

II.2.1.1 Ley de Newton

La **Ley de Newton** para la fuerza de resistencia sobre una esfera, aplica para el régimen de flujo turbulento, esta región está delimitada por los valores encontrados en la tabla 7.

Tabla 7. Rango de valores para los que aplica la Ley de Newton.

| Variable | Ley de Newton |
|------------------------------|---------------------------------|
| Re (adim) | 500 < Re < 200.000 |
| C_D (adim) | 0,44 |
| D_P (mm) | 1500 < D _P < 100.000 |
| K_{CR} (adim) | 2360 |

Fuente: Elaboración propia a partir de los valores expuestos por Ludwig (2001).

Tomando entonces el valor del coeficiente de arrastre de la tabla 7, y debido a que para la región de flujo turbulento este parámetro puede considerarse constante, según la Ley de Newton la ecuación (11) se puede simplificar como:

$$v_t = 1,74 \sqrt{\frac{g \cdot D_P \cdot (\rho_L - \rho_v)}{\rho_v}} \quad \text{Ec. 14}$$

II.2.1.2 Ley Intermedia

La Ley Intermedia, aplica para el régimen de flujo transitorio, región que está delimitada por los valores encontrados en la tabla 8.

Tabla 8. Rango de valores para los que aplica la Ley Intermedia.

| Variable | Ley Intermedia |
|------------------------------|-------------------------|
| Re (adim) | $2 < Re < 500$ |
| C_D (adim) | $\frac{18,5}{Re^{0,6}}$ |
| D_P (mm) | $100 < D_P < 1500$ |
| K_{CR} (adim) | 43,5 |

Fuente: Elaboración propia a partir de los valores expuestos por Ludwig (2001).

Si se sustituye la ecuación (12) y la expresión para el coeficiente de arrastre expuesto en la tabla 8, según la Ley Intermedia la ecuación (11) se puede expresar como:

$$v_t = \frac{0,153 \cdot g^{0,71} \cdot D_P^{1,14} \cdot (\rho_L - \rho_V)^{0,7}}{\rho_V^{0,29} \cdot \mu_V^{0,43}} \tag{Ec. 15}$$

II.2.1.3 Ley de Stokes

La Ley enunciada por Sir. George Stokes en 1851, fue derivada a partir de las fuerzas ejercidas sobre una partícula esférica pequeña, que fluye a través de fluido viscoso con cierta velocidad.

La Ley de Stokes, aplica para el régimen de flujo laminar, región delimitada por los valores encontrados en la tabla 9.

Tabla 9. Rango de valores para los que aplica la Ley de Stokes .

| Variable | Ley de Stokes |
|------------------------------|--------------------------|
| Re (adim) | 0,0001 < Re < 2 |
| C_D (adim) | $\frac{24}{Re}$ |
| D_P (mm) | 3 < D _P < 100 |
| K_{CR} (adim) | 33 |

Fuente: Elaboración propia a partir de los valores expuestos por Ludwig (2001).

Si se sustituye la ecuación (12) y la expresión para el coeficiente de arrastre expuesto en la tabla 9, según la Ley de Stokes la ecuación (11) se puede expresar como:

$$v_t = \frac{g \cdot D_p^2 \cdot (\rho_L - \rho_v)}{18 \cdot \mu_v} \tag{Ec. 16}$$

II.2.1.4 Ley de Stokes-Cunningham

Para partículas muy pequeñas se aplica la corrección a la Ley de Stokes conocida como la Ley de Stokes-Cunningham. Esta ley es significativa sólo para partículas de diámetros pequeños, debido a que para partículas de más de 16 micrones sólo corrige en menos de 1 %, Perry (1999a).

Sin embargo, como puede observarse en la tabla 10, el diámetro de partícula que concierne a esta ley es muy pequeño, con respecto a los tamaños de partículas considerados para los diseños de separadores líquido-vapor; por esta razón la corrección de Cunningham no será desarrollada con mayor profundidad ya que carece de fines prácticos en el tema correspondiente a este

proyecto de investigación.

Tabla 10. Rango de valores para los que aplica la Ley de Stokes -Cunningham.

| Variable | Ley de Stokes-Cunningham |
|--------------|--------------------------|
| Re (adim) | $Re < 0,0001$ |
| C_D (adim) | $\frac{24}{Re}$ |
| D_P (mm) | $0,1 < D_P < 3$ |

Fuente: Elaboración propia a partir de los valores expuestos por Ludwig (2001).

II.2.1.5 Movimiento Browniano

El Movimiento Browniano es el fenómeno físico estudiado en 1827 por Robert Brown, quien estudió el movimiento al azar de partículas microscópicas suspendidas en un líquido o en un gas (Británica, 1997).

De la misma manera que ocurre con la corrección de Cunningham, el Movimiento Browniano no será desarrollado con mayor profundidad por carecer de fines prácticos, debido a que aplica para partículas con diámetros muy pequeños.

Tabla 11. Rango de valores para los que aplica el Movimiento Browniano.

| Variable | Movimiento Browniano |
|------------|----------------------|
| Re (adim) | $Re < 0,0001$ |
| D_P (mm) | $0,001 < D_P < 0,1$ |

Fuente: Elaboración propia a partir de los valores expuestos por Ludwig (2001).

II.2.2 Variables operacionales incidentes en el arrastre de líquidos

Aún cuando no fue el objetivo de este proyecto realizar un procedimiento para el dimensionamiento de un separador líquido-vapor, se consideró necesario estudiar algunos parámetros involucrados en el proceso de diseño y su posible incidencia en el arrastre de líquidos en el tope de los separadores, debido a que errores en los cálculos de estas variables, pueden influir indeseablemente en el diseño de los recipientes, y afectar la eficiencia de los mismos.

Es necesario acotar, que el estudio realizado sobre la incidencia de las variables operacionales seleccionadas, se limitó al efecto que podrían ocasionar las mismas en el diseño de separadores de orientación vertical. Este criterio, fue seleccionado en base al conocimiento de que el procedimiento para dimensionar un separador líquido-vapor, difiere dependiendo de la orientación del recipiente, y que los separadores evaluados, son separadores líquido-vapor, en posición vertical, diseñados con eliminadores de neblina tipo malla y *baffles* de 90° adosados a la boquilla de entrada.

La selección de estas variables se basó en el estudio de las ecuaciones implicadas en el diseño de separadores líquido-vapor, así como también las leyes que rigen la separación, tales como la Ley de Newton, la Ley de Stokes, la modificación hecha a esta última por Cunningham, la Ley Intermedia, el Movimiento Browniano y los estudios realizados por diversos autores.

II.2.2.1 Velocidad del vapor

Con respecto a la velocidad del flujo de vapor en el separador, se deben definir principalmente los siguientes conceptos:

a) Velocidad terminal

La *velocidad terminal*, como se expuso anteriormente, es la velocidad relativa (constante) con que cae la partícula líquida en el separador a través del flujo de vapor, una vez que las fuerzas ejercidas sobre dicha partícula se equilibran y viene expresada por la ecuación (11). Esta velocidad es utilizada en el dimensionamiento de separadores líquido-vapor que no poseen dispositivos internos de coalescencia, debido a que la separación en el recipiente, en la sección en que ambas fases fluyen libremente, se basa únicamente en las fuerzas ejercidas sobre las partículas líquidas tal y como se dedujo en el apartado II.2.1.

b) Velocidad crítica

La *velocidad crítica* es la velocidad máxima permisible que puede alcanzar el flujo de vapor en la sección de asentamiento del separador sin que se produzca arrastre de líquido. La velocidad crítica se expresa según la ecuación (17), deducida por Souders y Brown en 1934. Esta velocidad es utilizada en el dimensionamiento de separadores líquido-vapor que poseen eliminadores de neblina, debido a que la separación en el recipiente, no sólo ocurre en la sección secundaria (donde se produce el asentamiento

gravitatorio, cuya teoría fue explicada con anterioridad); sino que dicha separación de las fases también se ve afectada por el elemento de choque.

$$v_c = K \sqrt{\frac{(\rho_L - \rho_v)}{\rho_v}} \quad \text{Ec. 17}$$

c) Velocidad de diseño

La *velocidad de diseño* es el valor que se toma para realizar el dimensionamiento del vapor, en un separador nuevo que se va a construir. Su valor depende de los criterios de diseño, sin embargo Ludwig (2001) propone utilizar como velocidad de diseño el 75% de la velocidad crítica (o la velocidad terminal en el caso que corresponda).

$$v_D = 0,75 \cdot v_c \quad \text{Ec. 18}$$

d) Velocidad del vapor

La *velocidad del vapor*, en el caso de un separador ya construido, vendrá dada por la expresión:

$$v_v = \frac{Q_v}{A_T} \quad \text{Ec. 19}$$

Según el GPSA (1998), frecuentemente se encuentran separadores sin eliminadores de neblina, que han sido diseñados utilizando la velocidad crítica en lugar de la velocidad terminal. Aunque utilizar una constante que agrupe el coeficiente de arrastre, el diámetro de partícula y otros parámetros, puede parecer incorrecto, esto se justifica en ocasiones debido a que:

- La selección del diámetro de partícula es un valor promedio y arbitrario, ya que la distribución de las partículas según su tamaño no se puede conocer con exactitud.
- Las partículas líquidas no son esferas rígidas en concentraciones diluidas, tal y como se supuso para realizar la deducción de la velocidad terminal.

En cuanto a la incidencia de la velocidad del vapor en el arrastre de líquidos en los separadores líquido-vapor, para que este fenómeno no ocurra, “teóricamente” debe suceder:

- En el caso del **diseño** de un separador, que la velocidad de diseño no exceda la velocidad crítica o terminal (dependiendo del caso).
- En el caso de la **evaluación** de un separador, que la velocidad del vapor en el recipiente, no exceda la velocidad crítica o terminal (dependiendo del caso).

Esta condición se debe cumplir, para que las partículas líquidas tengan mayor velocidad que el vapor, de forma tal que éste no arrastre al líquido en su ascenso por el separador. También se debe tener en cuenta, que velocidades muy altas del vapor, producirán el arrastre de las partículas pequeñas en la sección de asentamiento y el reatrapamiento de líquido a través de los eliminadores de neblina en el tope del separador.

II.2.2.2 Diámetro de la partícula

La selección del diámetro de partícula líquida a separar es arbitraria y se fija

dependiendo del servicio para el cual se diseña, tomando un valor promedio, bien sea a criterio del ingeniero que va a realizar el dimensionamiento o según las especificaciones del diseño que se requiere.

El diámetro de partícula, es un parámetro de vital importancia con respecto a la eficiencia del separador, ya que si el recipiente es capaz de separar partículas muy pequeñas, se tendrá un proceso de separación muy eficiente, gracias a la disminución del arrastre de líquidos por el tope de la unidad.

Se debe tener en cuenta que altas caídas de presión en el separador promoverán la formación de partículas más pequeñas.

A continuación se muestran algunos valores que pueden tomarse como referencia para el dimensionamiento de separadores según el tipo de servicio para el cual se diseña.

Tabla 12. Tamaño de la partícula a fijar para el dimensionamiento de un separador sin eliminador de neblina según el servicio que se requiere.

| Servicio | Diámetro de partícula (mm) |
|--|----------------------------|
| <i>Flare KOD</i> | 500 |
| Separador vertical y horizontal | 150 |
| Separador de reflujo | 225 |
| Separador a la entrada de una torre con riesgo de espuma | 50 |
| Separador en la succión de un compresor | 50 |
| Separador de gas combustible | 50 |

Fuente: Elaboración propia a partir de valores recomendados por TECHNIP (2000) y TECHNIP (2003).

A modo de información general, se presenta la tabla 13, en la que se pueden encontrar los rangos típicos de los diámetros de partículas que se pueden encontrar en algunos procesos químicos.

Tabla 13. Tamaños de las partículas según la aplicación en procesos típicos.

| Procesos típicos | Rango del diámetro de partícula (mm) |
|--|--------------------------------------|
| Condensados de plantas compresoras a elevadas presiones | 0,5 - 25 |
| Atrapamiento de partículas provenientes de evaporadores, y torres de destilación y absorción | 3 - 350 |
| Condensados de enfriadores inter-etapas en plantas compresoras | 5 - 100 |
| <i>Spray</i> producido por el estallido de burbujas en la interfase líquido vapor | 20 - 1000 |
| Atrapamiento desde enfriadores de agua y torres de enfriamiento por <i>spray</i> | 100 - 500 |
| Condensados de enfriadores de vapor | 100 - 500 |

Fuente: Elaboración propia a partir de la figura 1 de Enhanced Separation Technology (2002).

II.2.2.3 Coeficiente de arrastre

Según el GPSA (1998) el coeficiente de arrastre es función de la forma de la partícula y del número de Reynolds de la misma, el cual se define tal y como se expuso en la ecuación (12); de esta manera, el coeficiente de arrastre varía en función del régimen de flujo.

El coeficiente de arrastre ha sido estimado para tres rangos de valores del número de Reynolds tal y como se puede observar en la tabla 14. Sin embargo, en el año 1985, Gerhart citado por Jekel, et al (2001), estimó el coeficiente de

arrastre para números de Reynolds menores a 200.000 como:

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0,4 \quad \text{Ec. 20}$$

Aún así, para obtener el coeficiente de arrastre tendría que conocerse el número de Reynolds, que como se sabe depende a su vez de la velocidad terminal.

Por esta razón, y para evitar el método de ensayo y error, el GPSA (1998) plantea el siguiente procedimiento para encontrar el coeficiente de arrastre, utilizando un método gráfico que se puede describir de la siguiente manera:

a) A través de la siguiente fórmula se calcula el término $C_D Re^2$ como:

$$C_D Re^2 = \frac{0,95 \times 10^8 \cdot \rho_v \cdot D_p^3 \cdot (\rho_L - \rho_v)}{\mu_v^2} \quad \text{Ec. 21}$$

b) Con el valor obtenido a partir de la ecuación (21) que representa la abscisa de la figura 26 (ver apéndice C) se estima el coeficiente de arrastre.

Para conocer el régimen de flujo que predomina en el caso de estudio, Estopiñan, 1998, citado por Zabala (2005) consideró los límites inferior y superior del número de Reynolds de la Ley Intermedia y los evaluó en las ecuaciones del coeficiente de arrastre para cada régimen, para posteriormente calcular los límites del término $C_D Re^2$ encontrándose los resultados obtenidos en la tabla 14:

Tabla 14. Rango de valores obtenidos para el término $C_D Re^2$.

| Ley | Stokes | Intermedia | Newton |
|--------------------------|-----------------|-------------------------|---------------|
| Número de Reynolds | < 2 | 2 - 500 | 500 – 200.000 |
| Coefficiente de arrastre | $\frac{24}{Re}$ | $\frac{18,5}{Re^{0,6}}$ | 0,44 |
| $C_D Re^2$ | < 48,82 | 48,82 – 110.000 | > 110.000 |

Fuente: Elaboración propia a partir de valores expuestos por Zabala (2005).

Otro método diferente al gráfico utilizado por el GPSA (1998) para encontrar el valor del coeficiente de arrastre, utilizado por TECHNIP (2000), es calcular el valor del coeficiente de arrastre como⁸:

$$C_D = e^{[6,4348 - 1,1457 \cdot \ln(X) + 0,0578 \cdot (\ln X)^2 - 9,4 \times 10^{-4} \cdot (\ln X)^3]} \quad \text{Ec. 22}$$

Donde $X = C_D Re^2$ parámetro calculado a través de la ecuación (21), de la misma manera que el método sugerido por el GPSA (1998).

II.2.2.4 Factor de carga

El factor de carga del sistema, o constante “K” en la ecuación (17), es calculado empíricamente según el fabricante del eliminador de neblina, ya que éste depende de varios factores como: el tamaño de la partícula a separar, la carga de líquido, el tipo de interno, la presión de operación, la presencia o no de sólidos en la mezcla, la viscosidad del líquido, la viscosidad del vapor, la

⁸ TECHNIP (2000) acepta este método como válido, debido a que el error del coeficiente de arrastre obtenido a través de la ecuación (22) es menor al 4% en el rango de valores de $C_D Re^2$ de 10 a 10^6 . Además la precisión del método gráfico dependerá de la pericia del lector.

geometría del equipo, el coeficiente de arrastre, la altura por encima del eliminador o *disengaging height* y la tensión superficial, entre otros.

Se ha encontrado un valor de “K” igual 0,157 ft/s que generalmente es utilizado para dimensionar separadores; sin embargo, este valor es producto de suponer un coeficiente de arrastre de 0,44 (aplicable sólo para la ley de Newton, y un diámetro de partícula de 77 μm aplicable para la ley de Stokes). La mayoría de la bibliografía consultada indica que el factor de carga, debe ser corregido según la orientación del separador, el tipo de eliminador de neblina, la presión de operación y el tipo de mezcla que se maneja (para un dimensionamiento más estricto del separador); por esta razón, se presentan a continuación algunos valores de “K” que deberían ser utilizados, en el dimensionamiento preliminar, debido a que el valor final debe ser consultado con el fabricante del equipo.

En el caso de un dimensionamiento de un separador horizontal o cilíndrico que se diseña con eliminador de neblina, se pueden considerar los valores presentados en la tabla 15.

Tabla 15. Valores típicos del factor de carga utilizados para el dimensionamiento de separadores líquido-vapor con eliminador de neblina tipo malla, según la configuración del separador.

| Separador | Factor K (ft/s) |
|------------|-----------------|
| Horizontal | 0,40 – 0,50 |
| Vertical | 0,18 – 0,35 |
| Esférico | 0,20 – 0,35 |

Fuente: GPSA (1998)

La API (1989), propone los mismos valores expuestos por el GPSA (1998) en la tabla 15, sin embargo incluye las siguientes correcciones:

- El valor expuesto en la tabla 15, para separadores verticales es permitido para separadores de 10 pies de altura. Para separadores de 5 pies de altura se debe escoger un valor de K de 0,12 a 0,24 (ft/s).
- El valor expuesto en la tabla para separadores horizontales es permitido para recipientes de hasta 10 pies de longitud. Para separadores de mayor longitud, el factor escogido de la tabla 15 debe ser multiplicado por el

siguiente factor: $\frac{L^{0,56}}{10^{\theta}}$, donde L es la longitud del separador.

Con respecto a la orientación del separador, en los estudios realizados por Monnery, et al (2000), el autor expone que la experiencia ha demostrado que las velocidades horizontales pueden ser mayores que las verticales, debido a que en los separadores horizontales, el análisis de fuerzas difiere del realizado para separadores verticales [en los primeros la fuerza de arrastre y de gravedad no se oponen en un sólo vector, tal y como lo hacen en los separadores verticales]. Por esta razón, el autor citado propone la corrección⁹ del factor “K” de acuerdo a la orientación del separador de la siguiente manera:

$$K_H = F \cdot K_V \quad \text{Ec. 23}$$

⁹ Los factores de corrección del factor de carga, son empíricos o calculados en base al hecho de que una partícula requerirá menor tiempo, para caer en dirección vertical, que para hacerlo en la dirección horizontal entre las boquillas de entrada y de salida del líquido. (Monnery, et al., 2000)

$$F = \frac{L_E}{H_v} \tag{Ec. 24}$$

En el caso de conocer el tipo de eliminador de neblina y las condiciones del servicio para los cuales se diseña, se pueden tomar los valores de la tabla 30 (ver apéndice D). En la industria nacional, PDVSA (1991), propone el uso de los siguientes valores del factor de carga, según el tipo de orientación del separador.

Tabla 16. Valores del factor de carga “K” propuestos en separadores líquido-vapor según la orientación del separador.

| Separador | Relación de las tasas de flujo | K (ft/s) |
|------------|---|--|
| Vertical | $\frac{W_L}{W_v} < 0,1$ | 0,35 |
| | $0,1 < \frac{W_L}{W_v} < 1,0$ | 0,25 |
| | $\frac{W_L}{W_v} > 1,0$ | 0,20 |
| Horizontal | $2,5 < \frac{L}{D} < 4,0$ Nota: mínimo permisible L = 7,5 ft | 0,40 |
| | $4,0 < \frac{L}{D} < 6,0$ | 0,50 |
| | $\frac{L}{D} > 6,0$ | $0,5 \cdot \left(\frac{L}{L_B} \right) \cdot 0,05$ Nota: máximo permisible K = 0,7 Donde: $\frac{L_B}{D} = 6,0$ |
| | | |

Fuente: Elaboración propia a partir de la información expuesta por PDVSA (1991).

En el caso de un separador ya construido, en el cual se desea añadir un eliminador de neblina, se pueden considerar los valores del factor de carga de la tabla 17 en función de la altura que se debe dejar libre por encima del eliminador, conocida como *disengaging height*.

Tabla 17. Valores del factor de carga “K” permitidos en separadores líquido-vapor según el *disengaging height* o altura por encima del eliminador de neblina tipo malla de densidad 12 lb/ft³.

| <i>Disengaging height</i> (in) | Máximo K permitido (ft/s) |
|--------------------------------|---------------------------|
| 3 | 0,12 |
| 4 | 0,15 |
| 5 | 0,19 |
| 6 | 0,22 |
| 7 | 0,25 |
| 8 | 0,29 |
| 9 | 0,32 |
| 10 | 0,35 |
| 11 | 0,38 |
| 12 | 0,40 |
| 13 | 0,42 |
| 14 | 0,43 |

Fuente: Ludwig (2001).

En el caso de la variación del factor de carga por efectos de la presión de operación, “K” debe multiplicarse por un factor de corrección, tal y como se especifica en la tabla 18.

Sin embargo, según TECHNIP (2000), cuando la presión de operación sobrepasa los 1000 psig, el valor de K debe ser consultado directamente con el

fabricante del interno.

Tabla 18. Factor de corrección del “K” seleccionado, según el valor admisible en función de la presión de operación del separador.

| Presión (psia) | Factor de corrección |
|----------------|----------------------|
| 1 | 1 |
| 3 | 1 |
| 7 | 1 |
| 15 | 1 |
| 73 | 0,94 |
| 145 | 0,90 |
| 290 | 0,85 |
| 580 | 0,80 |
| 1160 | 0,75 |

Fuente: Fabian, et al (1993).

El factor de carga del sistema puede incidir en el arrastre de líquidos en el tope de los separadores líquido-vapor, no sólo en el valor final de la velocidad del vapor, sino también en que si se toman valores de “K” muy bajos, las partículas líquidas pueden permanecer en la trayectoria del vapor y pasar a través del dispositivo de coalescencia sin ser recolectado.

II.2.2.5 Relación líquido-vapor

Los flujos a manejar en el separador, tanto de vapor como de líquido, se deben tomar en cuenta principalmente, cuando se hace la selección del tipo de separador a diseñar para que la elección de la orientación del recipiente sea la más óptima, ya que un separador diseñado incorrectamente puede ocasionar arrastres excesivos de líquidos en el vapor de salida.

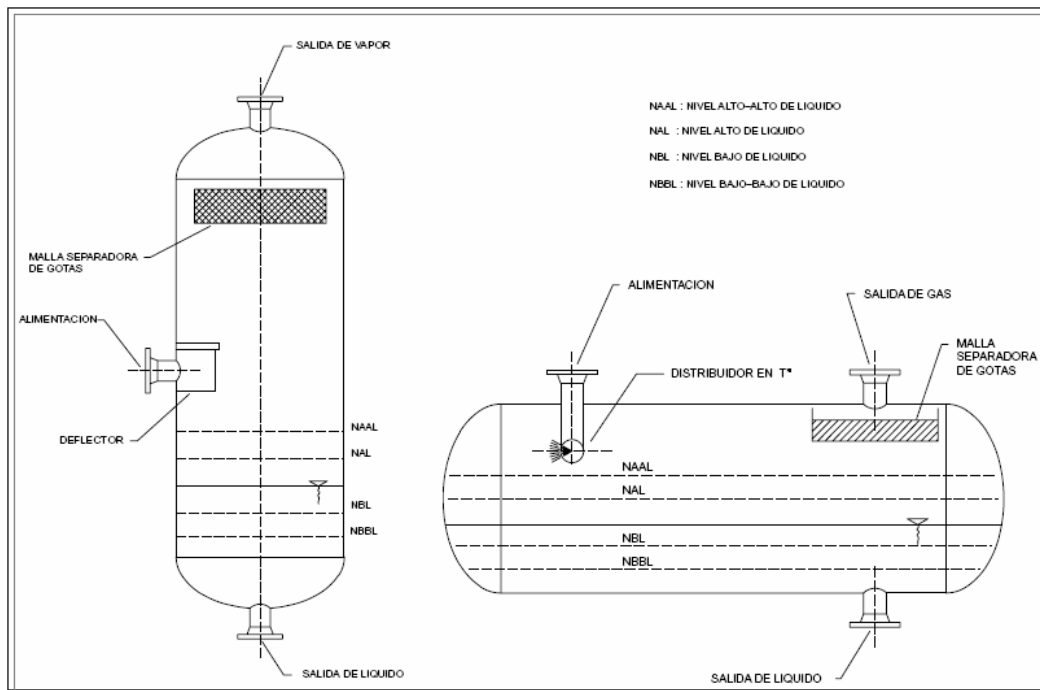
II.2.2.6 Nivel del líquido

En un separador, generalmente existen varios niveles de líquido que se denotan bajo las siglas correspondientes, según la Industria Petrolera Petroquímica Carbonífera Nacional (IPPCN).

Tabla 19. Siglas según las cuales se identifican los niveles de líquido en un separador líquido-vapor.

| Nivel del líquido | Siglas en Inglés | Siglas en español |
|-------------------|------------------|-------------------|
| Nivel alto-alto | HLL | NAAL |
| Nivel alto | HLL | NAL |
| Nivel normal | NLL | NNL |
| Nivel bajo | LLL | NBL |
| Nivel bajo-bajo | LLL | NBBL |

Fuente: PDVSA (1995a).



Fuente: PDVSA (1995a).

Figura 22. Niveles de líquido en un separador líquido-vapor.

Es importante tener en cuenta que los niveles HLL y LLL se conocen como niveles de operación, ya que ellos delimitan el volumen definido como **volumen de operación, liquid hold up** o **surge volumen**. El cual se fija para asegurar el control adecuado de la unidad de manera que se asegure la continuidad de las operaciones durante perturbaciones operacionales (PDVSA 1995b). El nivel mínimo LLLL y máximo HHLL del líquido se definen para asegurar un tiempo de respuesta por parte del operador o de los controles, en caso de contingencia.

Cabe destacar que las variaciones en el nivel del líquido en separadores horizontales son críticas¹⁰, debido a que el aumento del nivel se traduce en una disminución del área del vapor, con una consecuente disminución en el tiempo de retención de las partículas líquidas, haciendo que gotas de menor tamaño no sean separadas y que disminuya así la eficiencia del separador y aumentando las posibilidades de que se creen *slugs* en el recipiente.

II.2.2.7 Tiempo de residencia

El tiempo de residencia o de **retención**, es el tiempo promedio que debe ser retenida una partícula líquida en el separador para asegurar el equilibrio líquido-vapor a la presión de operación y se expresa como:

¹⁰ Siempre que se diseña un separador horizontal, se hace bajo la premisa de que el nivel del líquido no supera el 50% del volumen total del recipiente, o de lo contrario se presentarán problemas operacionales.

$$t_R = \frac{V}{Q_L} \tag{Ec. 25}$$

Generalmente, el término tiempo de residencia se usa para referirse al período que debe transcurrir para que una partícula líquida se desplace desde un nivel a otro en el recipiente. De esta manera, puede definirse como **tiempo de residencia de operación** o *surge time* al tiempo que tarda el flujo líquido en recorrer la distancia conocida como volumen de operación o *surge volumen*. Este lapso, se establece en función al servicio, a los requerimientos de control y a los equipos aguas abajo del separador PDVSA (1995b).

Frecuentemente la gravedad API del fluido determina el tiempo de residencia a utilizar en el dimensionamiento de separadores líquido-vapor de manera que se garantice la separación, a continuación se presentan algunos valores recomendados por API1 (1989) para el tiempo de retención:

Tabla 20. Tiempos de retención típicos según la gravedad API del crudo en separadores líquido-vapor.

| Gravedad del crudo | Tiempo de retención (min) |
|--------------------|---------------------------|
| > 35° API | 1 |
| 20° - 30° API | 1 a 2 |
| 10° - 20° API | 2 a 4 |

Fuente: API (1989).

Generalmente los tiempos de retención se estiman en función del lapso que debe tardar una partícula líquida en recorrer la distancia que existe entre dos

niveles de líquido (véase la tabla 31 en el apéndice E).

Sin embargo, se han encontrado referencias en las que se habla de “tiempo de residencia del vapor”, con el cual se refieren al tiempo que debe tardar el vapor, desde que entra en el recipiente, hasta que sale de él; siendo este tiempo de residencia el que podría incidir en el *carryover*, ya que de no ser seleccionado correctamente, el tiempo que tarda el vapor en recorrer la sección de asentamiento, no será suficiente para la separación de las fases y el líquido será arrastrado hasta el tope de la unidad.

Cabe destacar que cuando se evalúa un separador horizontal, frecuentemente se comparan los tiempos de residencia de las partículas líquidas en la sección libre del separador y el tiempo de residencia del vapor, de modo que se verifique que las primeras abandonen el recipiente en menor tiempo; mientras que en la evaluación de separadores verticales el criterio utilizado para chequear el arrastre de líquidos es chequear que la velocidad del vapor sea menor que la velocidad crítica.

En los recipientes horizontales el tiempo de residencia de una partícula es mayor que el tiempo que la misma necesitaría para recorrer los niveles de líquido en un separador vertical, por esto que los separadores horizontales permitan velocidades más elevadas del vapor, sin que ocurra arrastre de líquidos.

II.2.2.8 Tendencia a formar espuma

La formación de espuma en el separador, como ya se expuso anteriormente, es uno de los factores que afectan el desempeño correcto de estas unidades y que conducen a inundaciones en los eliminadores de neblina y al arrastre de líquidos. Debido a que la espuma tendrá menor densidad que el líquido se mantendrá en un nivel más alto y una vez que la espuma sobrepasa la altura de la boquilla de entrada del separador, el vapor la desplazará hacia la parte superior del separador produciendo un arrastre masivo (Lieberman, et al., 2002). Además la espuma perturba el sistema de control de la unidad.

II.2.3 Propiedades físicas de la mezcla incidentes en el arrastre de líquidos

Además de las variables estudiadas en el apartado anterior, se consideró la incidencia en el arrastre de líquidos, de algunas de las propiedades físicas tanto del líquido como del vapor.

II.2.3.1. Densidad del líquido

Cuando se definió el *momentum* de la mezcla en la sección II.1.2.1, se explicó que es la cantidad de movimiento que adquiere una fase al ser sometida a un cambio en su dirección; la variable responsable de que dicha fase alcance cierta velocidad es la densidad que ésta posee; de manera que, mientras el líquido sea más denso más rápida será la razón de asentamiento de estas partículas, lo que permitirá menores tiempos de residencia del líquido en la sección de asentamiento, para una eficiencia de separación dada (Lieberman, et al., 2002).

La densidad del líquido, según Amistco (2004) afecta además el tamaño del eliminador de neblina.

II.2.3.2. Densidad del vapor

De manera similar al efecto de la densidad del líquido, la densidad del vapor afectará la separación de las fases, aunque en este caso mientras la densidad del vapor sea menor, más rápida será la razón a la cual las gotas se asientan.

Tal y como lo expresa Amistco (2004), a elevadas presiones, la densidad del vapor tiende a ser tan elevada como la densidad del líquido, lo que resulta en una separación más difícil, debido a que en estos casos, el vapor arrastra con mayor fuerza las partículas líquidas en su trayectoria a través del eliminador de neblina, impidiendo que el dispositivo las capture.

II.2.3.3. Viscosidad del líquido

Según Amistco (2004), si la viscosidad del líquido es muy elevada, el drenaje del mismo en el eliminador de neblina será impedido, lo que producirá inundaciones de los extractores, disminución de la velocidad de vapor y de las cargas de líquido permitidas, provocando un arrastre severo de líquido en el separador.

En estos casos se recomienda utilizar eliminadores de neblina tipo *vanes* con bolsillos dobles, debido a que estos internos son los mejores en el manejo de líquidos viscosos, sin que se produzca taponamiento del extractor.

II.2.3.4. Viscosidad del vapor

En cuanto a la viscosidad del vapor, mientras mayor sea este parámetro, mayor dificultad tendrán las partículas líquidas para separarse de la fase vapor, lo que significará mayor arrastre de líquidos en el tope del separador; de esta manera mientras más baja sea la viscosidad del vapor, tal y como lo expresa Lieberman, et al. (2002), más rápida será la razón de asentamiento.

II.2.3.5. Tensión superficial

Como se explicó anteriormente, la tensión superficial es la fuerza que se opone al aumento del área del fluido; esto significa que a menores valores de tensión, menor es la resistencia que opone la partícula líquida a aumentar de tamaño, y su separación será más difícil. Además la tensión superficial varía inversamente con el número de Weber que es una estimación del tamaño máximo de estabilidad de una partícula en un flujo bifásico (BP, 1980). El número de Weber es adimensional y se expresa como:

$$We = \frac{n_t^2 \times \Gamma_v \times D_p}{S} \quad \text{Ec. 26}$$

Cuando el número de Weber alcanza valores crítico, las partículas líquidas estallan, creando gotas muy pequeñas que eventualmente serán arrastradas por el vapor.

II.2.4 Condiciones de operación que inciden en el arrastre de líquidos

II.2.4.1. Presión de operación

Como se ha expuesto anteriormente, varios factores son función de la presión a

la que opera el recipiente en el que se lleva a cabo la separación, como por ejemplo el tipo de interno de coalescencia a utilizar, la corrección que se hace al factor de carga escogido, la posible formación de hidratos (cuando se manejan presiones elevadas), y algunas otras consideraciones en el dimensionamiento del recipiente. Además cambios en la presión de operación del sistema pueden promover la deposición de asfaltenos y parafinas, debido a que puede disminuir las solubilidades de estos compuestos en la mezcla.

Sin embargo la influencia más notable de este parámetro de operación, se encuentra en que en el dimensionamiento de separadores críticos (aquellos separadores que operan por encima de 435 psig) el dimensionamiento debe basarse en el modelado dinámico del comportamiento de las fases dentro del recipiente mediante programas de simulación (TECHNIP, 2003).

II.2.4.2. Temperatura de operación

Con respecto a la temperatura de operación, ésta puede influir de la misma manera que la presión, como agente promotor de la deposición de asfaltenos y parafinas, y además es un factor determinante en la formación de hidratos de gas, en el caso de que la temperatura en el separador sea muy baja, ya que el vapor de agua puede condensarse.

Además como es bien sabido, las propiedades físicas como la densidad y la viscosidad son función de la temperatura, en este sentido, cambios en la temperatura de la mezcla pueden ocasionar variaciones en las propiedades del

líquido y del vapor con sus subsiguientes consecuencias.

II.2.4.3. Flujos

Es importante tener en cuenta que las variaciones en los caudales, afectan directamente el funcionamiento de los internos instalados, seleccionados en base a criterios de capacidad de líquido y vapor a manejar en el separador y que además producen los denominados *slugs* en la sección de recolección del líquido, que perturban la eficiencia de la unidad.

II.2.5 Incidencia de la instrumentación en el arrastre de líquidos

En los separadores generalmente existen algunos instrumentos para controlar varios parámetros como presión, temperatura, nivel del líquido o para cumplir con requerimientos de seguridad. En todo caso, el parámetro que puede afectar el arrastre de líquidos en los separadores líquido-vapor es el control de nivel, ya que perturbaciones en el nivel del líquido producen flujo de avance, *slugs*, y espumas que promueven la inestabilidad de la mezcla en el recipiente y aumentan las posibilidades de arrastrar partículas líquidas en la corriente de vapor. Además, se debe tener especial atención en la localización del instrumento de lectura del nivel, ya que en caso de que el nivel del líquido pueda llegar a niveles inferiores, las lecturas pueden ser erróneas y el desempeño del controlador del nivel en el recipiente será deficiente. En los lazos de control de nivel, básicamente existe un **transmisor** de nivel del líquido, un **controlador** de nivel, que genera la señal que va dirigida a la válvula de control, luego de pasar por un **convertidor I/P**. Además posee **interruptores por alto nivel** (activan la apertura total de la válvula de

control, para evitar el *carryover*), e **interruptores de bajo nivel** (permiten cerrar totalmente la válvula de control, para evitar *carryunder*). El separador puede contar con un **visor de nivel** de líquido en la sección de recolección, para dar apoyo al operador y verificar el nivel de los líquidos en campo.

II.3 Estado del Arte

El Estado del Arte, es un estudio que consiste en la búsqueda de información exhaustiva (en diversas fuentes bibliográficas) relativas al tema que se desea investigar; éste consta de todos aquellos adelantos que se han hecho en el campo de estudio y en este caso en particular, pretende investigar, cuales son las tendencias actuales en el mundo para tratar el fenómeno conocido como *carryover*. El material investigado se clasificó en las siguientes categorías:

II.3.1 Tecnologías y tendencias

El Estado del Arte realizado pretende resumir las tecnologías utilizadas actualmente para minimizar el arrastre de líquidos en separadores líquido-vapor, y hacia adonde apuntan las tendencias tecnológicas en el siglo XXI. Desde hace más de medio siglo, se han desarrollado dispositivos especiales para remover la neblina de las corrientes de gas. Tradicionalmente, los dispositivos más populares para reducir el arrastre de líquidos en separadores líquido-vapor han sido los eliminadores de neblina tipo malla.

Para el desarrollo y mejoramiento de este tipo de internos de coalescencia, diversas compañías del mundo entero emplean al año miles de horas hombre, con

el propósito de mejorar sus productos en un mercado que cada día se hace más competitivo a medida que entramos en el siglo XXI.

Recientemente se han desarrollado tecnologías que han permitido un gran progreso en el diseño de los eliminadores de neblina, en la selección de los materiales a partir de los cuales se fabrican y de los nuevos diseños a partir de las experiencias obtenidas de las distintas aplicaciones.

Se puede decir que en la actualidad se vive una especie de “**era ciclónica**”, a la cual se suma el uso de **internos de superficie tratada químicamente**, las cuales se perfilan como la competencia más agresiva de los internos tradicionales. Sin embargo, hoy en día existen mayores expectativas con respecto a los eliminadores de neblina y muchos de los avances encontrados, aún se encuentran en su etapa de desarrollo.

Dado que el área a la que concierne este trabajo de investigación, depende no sólo de la teoría sino de resultados empíricos producto del ensayo y error, aún habrá de transcurrir algún tiempo antes de que se pueda asegurar si los nuevos avances realmente son más eficientes que los métodos tradicionales. A continuación se presentan las tecnologías, patentes, y tendencias encontradas en la realización del Estado del Arte:

II.3.1.1. Eliminadores de neblina tipo malla

La tecnología utilizada para fabricar los tradicionales eliminadores de neblina tipo mallas, ha mejorado con el pasar de los años. Hoy en día se encuentran

mallas con diferentes tipos de tejidos y materiales, capaces de conseguir una separación de partículas más fina. Las **mallas renovadas**, por denominarlas de un modo diferente a las tradicionales, tienen altas eficiencias de remoción y mayores flexibilidades en el flujo de diseño; además, estas mallas renovadas, han sido diseñadas en base a resultados experimentales, que en la mayoría de los casos producen beneficios más acordes con la práctica que aquellos encontrados a partir de bases teóricas, en lo que al tema de separación física se refiere.

Aunque este tipo de eliminador de neblina es el dispositivo más utilizado en recipientes de separación mecánica en refinerías y plantas petroquímicas, las mallas siguen teniendo la desventaja del **taponamiento**. A continuación se muestran las principales mallas encontradas en el mercado actual y sus proveedores:

a) MistFix™



- Fabricado por:** Amistco Separation Products, Inc.
- Patentado por:** Amistco Separation Products, Inc. (Patente US 5.985.004)
Es un eliminador de neblina de malla tejida en forma de cilindro.
El MistFix se introduce verticalmente en el recipiente, por la boquilla de salida del vapor.
- Características**
Es un excelente sustituto de las mallas convencionales debido a que evita entradas peligrosas a los recipientes, el corte de recipientes que no tienen accesos y además ofrecen mayor rapidez para ser cambiados por mantenimiento.
Es excelente para ser añadido a recipientes que fueron diseñados sin internos.

Fuente: <http://www.amistco.com/PRODUCTS/ELIMINATORS/mistfix.html>

b) VKR Enhanced™



Fabricado por: Knitmesh

Patentado por: BECO Engineering (Patente US 5.439.510)

Características

Este tipo de eliminador de neblina, diseñado en 1995, tiene un alto desempeño debido a que utiliza elevadas velocidades, lo que aumenta el impacto inercial de las partículas líquidas contra las fibras.

Además, tiene unos canales recolectores de líquido en forma de V estratégicamente localizados en la parte inferior de la malla.

Fuente: http://hub12.data-centre.info/knitmesh/data/vkr_mist_eliminator.pdf

c) Mist-Master™



Fabricado por: Enhanced Separations Technologies, Ltd

Patentado por: BECO Engineering

Características

Eliminador de neblina tipo malla de alta capacidad, su diseño es beneficioso para contrarrestar problemas de drenaje y de inundación del extractor debido a que posee unos drenajes para el líquido

Fuente: <http://www.becoengineering.com/mistelimination.html>

d) Demister®



Fabricado por: Koch-Glitsch, LP.

Patentado por: YORKMESH™

Características

El extractor de neblina Yorkmesh™ style 82 DEMISTER® utiliza una combinación de alambres metálicos y de fibras de poliéster para asegurar un 99,9% de remoción de partículas de 2 a 5 µm de diámetro. Sin embargo pueden ser hechos de diversos metales o plásticos para ofrecer una alta eficiencia de separación, bajos costos de instalación y bajas caídas de presión.

Fuente: <http://www.koch-ottoyork.com/products/DEMISTER.htm>

II.3.1.2. Eliminadores de neblina tipo *vanes*

De la misma manera, la tecnología utilizada para fabricar los tradicionales eliminadores de neblina tipo *vanes* también ha mejorado. Actualmente, se encuentran *vanes* de alta eficiencia que utilizan los bolsillos, simples o dobles, y los canales de drenaje de líquido, para conseguir una separación de partículas más eficiente.

Los eliminadores de neblina tipo *vanes*, permiten el manejo de líquidos más viscosos y mayores velocidades que las mallas, pero su principal desventajas es su alto costo y la sensibilidad a variaciones en el flujo. A continuación se muestran algunos *vanes* y los proveedores que los fabrican:

a) Eliminador de neblina tipo *vane* de configuración radial (construida para los separadores VRF).

Fabricado por: NATCO Group

Eliminador de neblina colocado en los separadores *Vertical Radial Flor (VRF)*.



Características

Es un eliminador de neblina con diseño circular, instalado de manera que el vapor fluya radialmente desde el centro del extractor hacia los bordes traseros.

El diseño radial es especialmente beneficioso para equipos existentes en los que se requiere aumentar la capacidad sin cambiar todo el recipiente.

Debido a que el área superficial de entrada de la vena es muy pequeña, las velocidades alcanzadas por el vapor son más elevadas, lo que aumenta la eficiencia de captura de la partícula.

Fuente: <http://www.natcogroup.com/Content.asp?t=ProductPage&ProductID=37>

b) FLEXICHEVRON®



Fabricado por: Koch-Glitsch, LP.

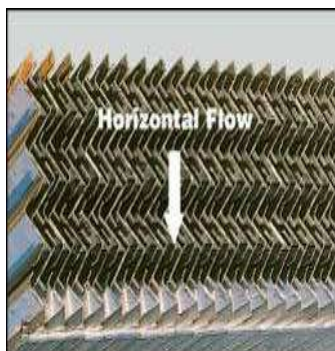
Patentado por: YORKMESH™

Estos eliminadores de neblina, son placas deflectoras en forma de zig-zag, que pueden ser diseñadas para flujos horizontales o verticales. Estos extractores recolectan prácticamente el 100% de las partículas entre 8 y 40 μm , según sean diseñados.

Características Pueden fabricarse de materiales como aleaciones de metales, plásticos reforzados por fibras y plásticos térmicos. Ideal para mezclas con líquidos viscosos. Tienen caídas de presión muy pequeñas y manejan cargas con grandes cantidades de líquido.

Fuente: <http://www.koch-ottoyork.com/products/FLEXICHEVRON.htm>

c) Double-pocket vanes



Fabricado por: Amistco Separation Products, Inc.

Estos eliminadores de neblina son diseñados con un factor de carga de 1,15 ft/s, lo que permite velocidades más elevadas que se traducen en una eficiencia del 100% en la remoción de partículas mayores a 8 μm .

Características

Las *vanes* de bolsillos dobles de Amistco, ofrecen altas eficiencias ya que pueden operar para el doble de las capacidades que las venas convencionales. Los bolsillos previenen el reatrapamiento del líquido separado.

Fuente: http://www.amistco.com/PRODUCTS/ELIMINATORS/msh_vne.html

d) AZGAZ®



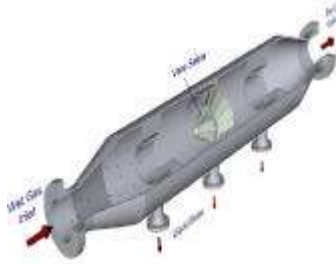
Fabricado por: Merpro Ltd.

AZGAZ® es un separador líquido-vapor que utiliza la fuerza centrífuga y el movimiento rotacional a través de aletas fijas. Es compacto y aunque no maneja *slugs*, tiene bajas eficiencias y es susceptible a la erosión y a los taponamientos, separa el 99% de partículas mayores a 11 µm.

Características

La caída de presión de este separador puede llegar a ser muy pequeña, de hasta 2,4 in de agua dependiendo de las condiciones de flujo.

El mantenimiento del recipiente es mínimo y necesita poco de controles o entradas por operadores.



Fuente: <http://www.merpro.com/PRNFrontend/upload/MTD08%20Azgaz.pdf>

II.3.1.3. Internos ciclónicos

La tecnología ciclónica, denominada anteriormente como la tecnología que define la **nueva era**, revoluciona los procesos de separación al utilizar fuerzas centrífugas, en contraposición a la fuerza de gravedad y la coalescencia utilizada en los separadores tradicionales.

Los separadores ciclónicos, ofrecen las ventajas de evitar la espuma, proveer mayores eficiencias con equipos más compactos, y eliminar los taponamientos o las inundaciones de los eliminadores de neblina convencionales. Las desventajas presentadas por estas innovadoras unidades, son las altas caídas de presión que presentan, el hecho de no manejar bien los *slugs*, y que la eficiencia de remoción cae con las variaciones en los flujos de entrada. A continuación se presentan los ciclónicos encontrados actualmente y los proveedores que los fabrican:

a) Compact Cyclone Inlet Device (G-Sep™ CCI)



Fabricado por: Aker Kværner ASA.

Patentado por: Aker Kværner ASA.

Características

Este dispositivo de entrada ciclónico patentado, es instalado en separadores líquido-vapor por gravedad para lograr la separación primaria de las fases.

Son varios tubos ciclónicos que utilizan la fuerza centrífuga para separar las fases.

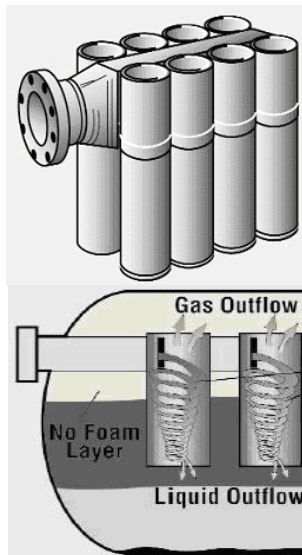
Permiten mayores velocidades y cambios de dirección más bruscos.

Previene la formación de espumas en las mezclas.

Fuente:

<http://www.akerkvaerner.com/Internet/IndustriesAndServices/OilAndGas/SeperationTechnologyAndProcessSystems/WellstreamseparationOilTreatment/CompactCycloneInletDevice.htm>

b) Porta-Test Revolution™



Fabricado por: NATCO Group

El *Porta-Test Revolution™* es un dispositivo ciclónico de entrada que controla la formación de espumas y mejora el manejo de fluidos en el separador.

Son una serie de tubos centrífugos conectados, a la boquilla de entrada del separador.

Características

La entrada de los fluidos es tangencial y llegan a utilizar una fuerza centrífuga equivalente a 200 veces la fuerza de gravedad.

Minimiza el tamaño de los recipientes, aumenta la eficiencia para capacidades de flujos más elevados, elimina el uso de químicos antiespumantes y reduce el arrastre de líquidos fuera del separador.

Fuente: <http://www.natcogroup.com/Content.asp?t=ProductPage&ProductID=30>

c) SpiraFlow™

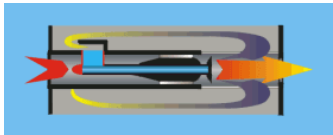


Fabricado por: CDS Engineering.

Este eliminador de neblina, consiste en un grupo de tubos ciclónicos a través de los cuales el flujo puede ser horizontal o vertical. El diámetro de cada tubo es de 2 a 3 in, el cual es seleccionado en base a la eficiencia y la caída de presión requeridas. Uno de los mayores beneficios es su elevada capacidad para manejar altos flujos de vapor y las ventajas para romper las espumas que puedan formarse.

Características

Una vez más, la tecnología ciclónica ofrece la ventaja de que se diseñan recipientes más pequeños, de alta presión a menores costos. Este dispositivo separa partículas mayores a 5 μm (en condiciones atmosféricas).



Fuente: <http://www.cdsengineering.nl/>

d) Twister™ Supersonic Separator



Fabricado por: Twister BV

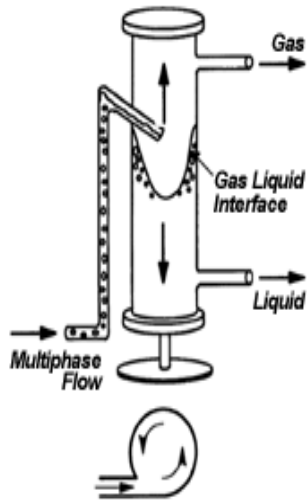
El separador supersónico Twister™ es una combinación única de procesos físicos que combina la aerodinámica, la termodinámica y la dinámica de fluidos para conseguir un proceso revolucionario de acondicionamiento de gas. La separación a velocidades supersónicas se lleva a cabo en un dispositivo tubular compacto.

Características

Su boquilla de entrada permite una expansión del vapor saturado de la alimentación, con su consecuente disminución de presión y temperatura. De esta manera pueden condensar hidrocarburos en forma de niebla, los cuales son separados por fuerzas centrífugas de más de 300.000 g en su aleta supersónica. Posteriormente el flujo bifásico con elevada vorticidad, se separa y recupera entre 65 y 80% de su presión inicial. Finalmente el líquido separado es recolectado en una cámara compacta para la desgasificación.

Fuente: <http://www.twisterbv.com/>

e) GLCC – Gas-Liquid Cylindrical Cyclone®



Características

Derechos de autor : Universidad de Tulsa.

El GLCC es un separador simple, compacto, ligero en peso, bajo en costo y eficiente, desarrollado por Tulsa University's Separation Technology Projects (TUSTP) en 1994.

Requiere de poco mantenimiento y es de fácil instalación y operación.

Es un cambio revolucionario en el área de la tecnología de separación compacta.

El GLCC reduce además la formación de espuma y disminuye los tiempos de residencia. Aún está desarrollándose, por lo que hay poca experiencia práctica al respecto. Sin embargo, al contrario de los separadores convencionales, el GLCC ha sido diseñado y desarrollado en base al modelaje con CFD.

Como todos los ciclónicos, sus caídas de presión son altas y su entrada inclinada es beneficiosa para minimizar el arrastre de líquidos, debido a que provee una separación inicial en la boquilla de entrada, y produce el movimiento descendiente en espiral del líquido en la alimentación.

Fuente: http://www.tustp.org/about_the_glcc.html

f) Separador Helicoidal DHELIX

Proveedor:

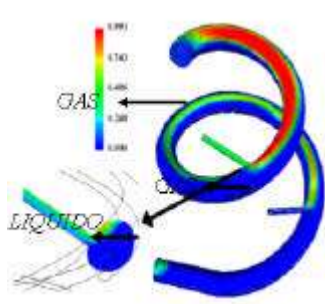
INTEVEP – PDVSA.

El Separador Helicoidal DHelix de INTEVEP (filial de PDVSA), aprovecha la fuerza centrífuga y de corte para producir la separación de la mezcla líquido-vapor.

Entre sus ventajas principales se encuentra su bajo costo, su configuración compacta y el hecho de que es adecuado para separación en pozos, líneas y en la medición.

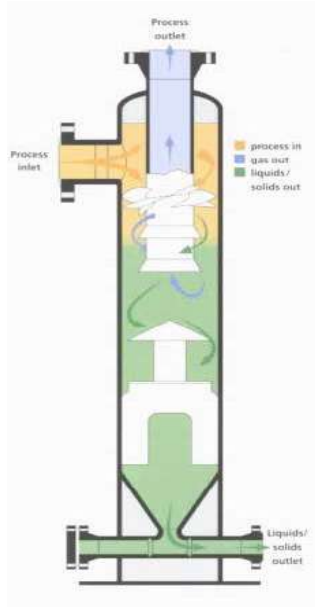
Sin embargo es una tecnología que se encuentra aún en la fase de desarrollo (muestra piloto).

Características



Fuente: PDVSA - INTEVEP

g) Separador Gasunie™



Proveedor:

CDS Engineering.

Características

Es un separador líquido-vapor ciclónico con aspas de geometría óptima, que producen el movimiento rotatorio de la mezcla. La fuerza centrífuga resultante, hace que las partículas líquidas y sólidas sean desplazadas hacia las paredes del recipiente, a través de las cuales drenan hacia abajo a la zona de recolección del líquido, en la que se encuentran unos *baffles* fijos que detienen el vórtice del líquido y un plato bloqueador que previene que este sea reatrapado en la fase vapor.

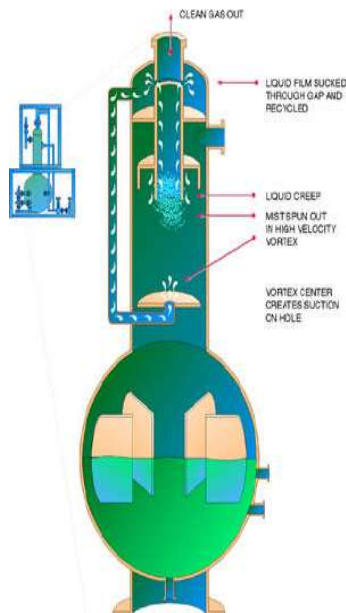
Este separador es compacto y ligero, pero produce una alta caída de presión, no maneja *slugs* y es de baja flexibilidad.

Es de fácil mantenimiento y tiene baja tendencia a taponarse.

Muy recomendable para utilizar en plantas costa afuera.

Fuente: http://www.cdsengineering.com/product_cyclone.html

h) Separador Expro Mega Flow



Proveedor:

EXPRO Group.

Características

Es un separador que cambian la separación vertical y horizontal, pero que además posee configuración esférica, y que utiliza fuerzas centrífugas y vórtices invertidos para conseguir la separación de las fases.

Provee dos etapas de separación: en la primera, el líquido es separado del vapor a través de la fuerza centrífuga y es recolectado en el sumidero de fondo, mientras que en la segunda fase, el líquido atrapado en el vapor es separado por un aumento de la fuerza centrífuga.

Es compacto, puede manejar flujos elevados y provee altas eficiencias. Aún así las caídas de presión son elevadas, tiene baja capacidad para manejar variaciones en el flujo y aún no ha sido aprobado para crudos pesados.

Puede manejar un amplio rango de temperaturas y altas presiones de operación.

Fuente: <http://www.exprogroup.com/corpus/separators/separators.asp>

II.3.1.4. Otras tecnologías

a) Combinación de mallas y vanes

Estudio realizado por: Amistco Separation Products, Inc.

Amistco propone que la combinación de eliminadores de neblina tipo malla y tipo *vane* puede ser de gran valor en ciertas aplicaciones.

La colocación de un eliminador tipo vena después de una malla combina la elevada eficiencia de la malla, con el valor superior de la vena, de esta manera la malla servirá como aglomerador o coalescedor de partículas pequeñas, mientras que las partículas reatrapadas en el vapor aguas arriba de la malla, se encontrarán por debajo del límite de tamaños de las partículas que pueden ser atrapadas por la vena. El factor de carga del sistema vendrá dado por la vena.

Características

En aplicaciones de mallas cotejadas, en las que la velocidad de reatrapamiento es excepcionalmente baja, es indispensable colocar un eliminador tipo vena antes de la malla. Esto logrará combinar la elevada eficiencia de la malla, con la gran capacidad de las venas de manejar elevadas cargas y manejar sólidos. El factor de carga de esta combinación vendrá dado por la malla.

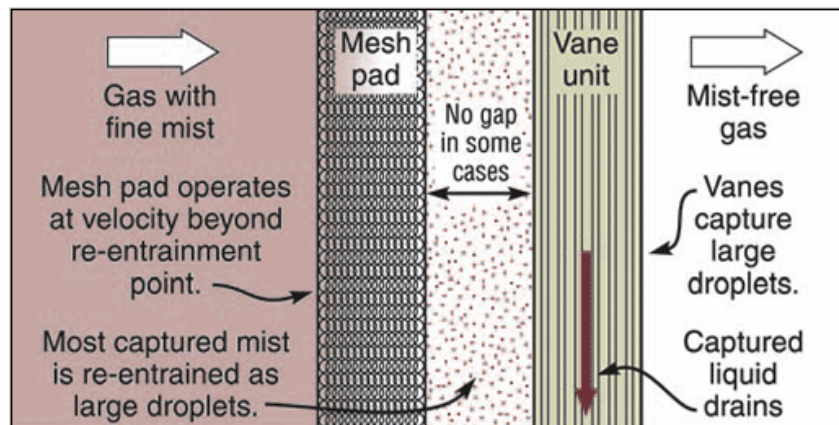


Figure 20: Boosting throughput and efficiency of a mesh pad by following it with a vane unit

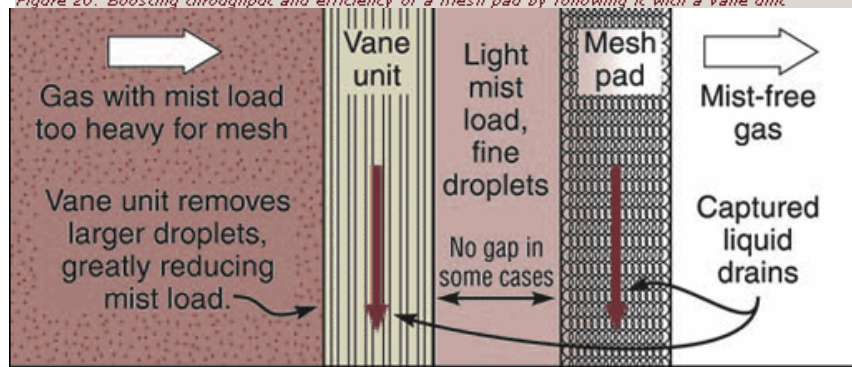


Figure 21: Shielding a mesh pad from a very heavy mist load with a vane unit ahead

Fuente: http://www.amistco.com/PRODUCTS/ELIMINATORS/msh_vne3.html

b) DC Coalescer

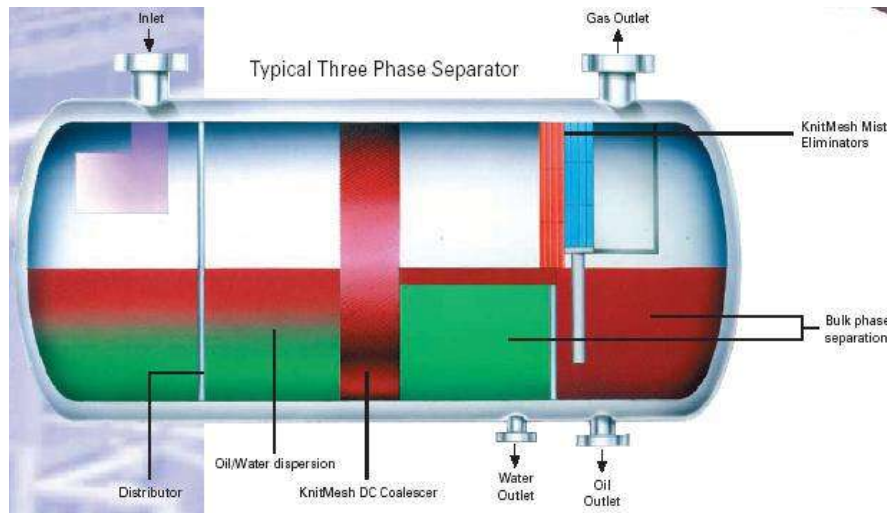
Patentado por: Knitmesh.

El DC Coalescer fue desarrollado a partir de un concepto inventado por el Instituto de Ciencia y Tecnología de la Universidad de Manchester.

La esencia del diseño es utiliza dos materiales con diferentes energías superficiales (generalmente metal y plástico).

Características

El principio se basa en bajas energías de superficie para dar como resultado una separación eficiente; además de que la razón de coalescencia aumenta significativamente cuando las partículas capturadas se encuentran en la unión de ambos materiales.



Fuente: <http://hub12.data-centre.info/knitmesh/data/coalescers2.pdf>

c) York-Evenflow™



Fabricado por: Koch-Glitsch, LP.

Patentado por: Koch-Otto York™

Características

Es un dispositivo de entrada tipo vena utilizado para disminuir el *momentum* de la corriente de alimentación, lo que permite la remoción primaria del líquido y una mejor distribución del vapor.

Además este dispositivo reduce la velocidad del vapor que fluye sobre la superficie del líquido, previniendo el reatrapamiento.

Fuente: <http://www.koch-ottoyork.com/products/EVENFLOW.htm>

d) E-Pack



Fabricado por: BECO Engineering.

El relleno tipo filtro, son cubos de $\frac{3}{4}$ de pulgada descargados al azar que forman una almohadilla que permite separar el líquido y el vapor.

Características Tiene una alta eficiencia para partículas de $3 \mu\text{m}$ y puede tolerar sólidos.

Su mayor ventaja, con respecto a los eliminadores tradicionales, es la poca probabilidad de inundación del relleno.

Fuente: <http://www.becoengineering.com/mistelimination.html>

e) Horizontal Dual Flow Separators Lower Flowing Velocities to Reduce Size

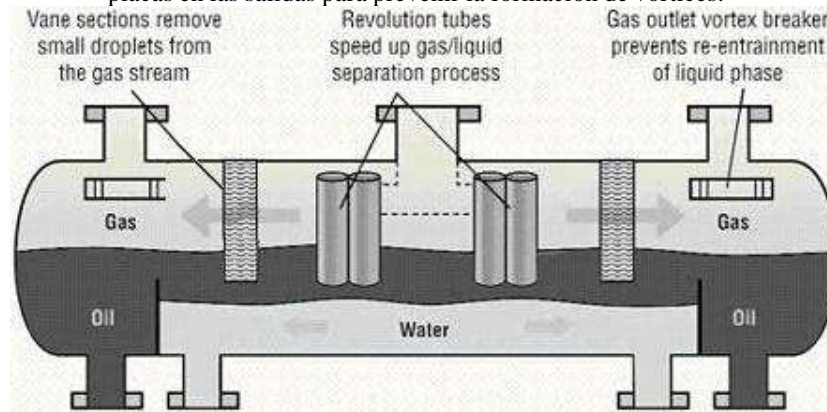
Fabricado por: NATCO Group.

El Separador horizontal *Dual Flow* ofrece una alternativa para reducir la velocidad horizontal de las fases, ya que éste parámetro es el responsable del área requerida.

Características

Maneja flujos más grandes sin necesidad de aumentar el tamaño del recipiente. La boquilla de entrada está localizada en el centro del recipiente, en la cual se incluye un dispositivo para controlar el *momentum* del fluido de entrada, con la característica de que dicho dispositivo está diseñado para dividir el flujo uniformemente hacia las dos boquillas de salida, en cada extremo.

Además tiene instalados los dispositivos para la eliminación de la niebla y las placas en las salidas para prevenir la formación de vórtices.

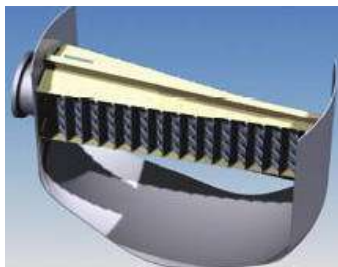


Fuente: <http://hub12.data-centre.info/knitmesh/data/coalescers2.pdf>

f) Schoepentoeter™

Fabricado por: Sulzer Chemtech.

Patentado por: Shell



Características

El Schoepentoeter™ es un dispositivo de entrada tipo vena que provee de una excelente distribución, separación de fases y que produce una caída de presión despreciable.

Requiere de boquillas de entrada de menor diámetro que los internos convencionales. El diseño de este dispositivo puede ser adaptado según los requerimientos del servicio.

Estudios de modelaje con CFD pueden ayudar a mejorar el diseño del dispositivo cuando deba trabajar en condiciones críticas.

Fuente: http://www.sulzerchemtech.com/eprise/SulzerChemtech/Sites/products_services/masstransfer/shell.html

g) Compact Porta-Test Whirlyscrub V™

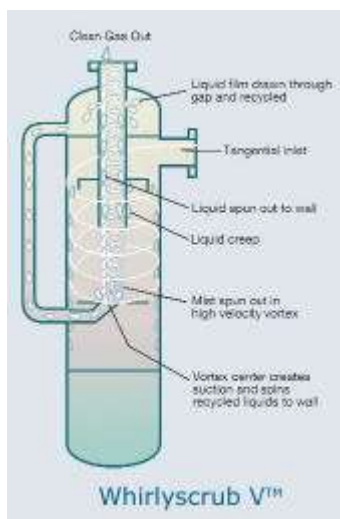
Fabricado por: NATCO Group.

Separador capaz de capturar hasta 99,9% de partículas mayores a 10 µm.

Son pequeños, livianos, disminuyen la formación de espuma y la eficiencia de separación mejora a medida que el flujo de vapor aumenta.

La separación primaria se da cuando el vapor entra tangencialmente y se crea una fuerza centrífuga que envía las partículas líquidas hacia las paredes del recipientes.

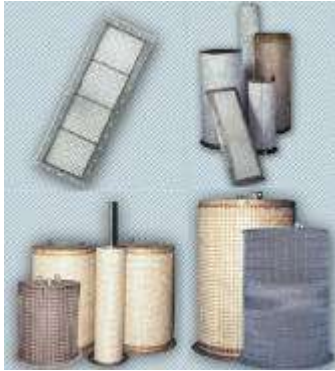
La separación secundaria, ocurre a medida que el vapor gira en el centro del separador y entra en el tubo vórtice, en el cual aumenta la velocidad del vapor. El líquido que pudiera ser separado en esta sección y 10% del vapor, salen por una abertura lateral y regresa a la sección primaria.



Características

Fuente: <http://www.natcogroup.com/Content.asp?t=ProductPage&ProductID=32>

h) Flexifiber®



Fabricado por: Koch-Glitsch, LP.

Patentado por: YORKMESH™

Características

Los eliminadores de neblina FLEXIFIBER®, son lechos de fibra empacada entre dos pantallas paralelas o concéntricas. Los soportes son fabricados según las necesidades del cliente y de materiales como: aleaciones metálicas, plásticos o FRP, mientras que los lechos son hechos de cerámica, vidrios especiales, carbón, polipropileno, y fibras de poliéster, entre otros.

Pueden llegar a separar un 99,95% de partículas submicrónicas (0,1 μm) y la caída de presión puede alcanzar 1,5 in de agua.

Fuente: <http://www.koch-ottoyork.com/products/FLEXIFIBER.htm>

II.3.1.5. Internos de superficie tratada

Los coalescedores (como el desarrollado por Knitmesh), son unas de las unidades más innovadoras en la separación líquido-vapor. Según Wines (2003), el desempeño de estas unidades es superior al de los separadores por gravedad, a las mallas, a las venas, a los filtros y a los lechos de fibra. Los coalescedores son especialmente diseñados para separar partículas muy pequeñas y pueden ser contruidos de vidrio, metal, polímeros y fluoropolímeros; generalmente difieren en sus configuraciones, pero tienen en común el gradiente del tamaño de poro, que va desde poros de tamaños pequeños a poros más grandes, en la dirección del flujo. Estos equipos operan en tres etapas:

- a) Separación de sólidos.
- b) Coalescencia de pequeñas partículas.

c) Separación de las partículas coalescidas, de la corriente de vapor que se purifica.

A continuación se muestra una unidad coalescedora, en la cual las partículas mayores a $300\ \mu\text{m}$ son removidas por asentamiento gravitatorio, posteriormente el vapor fluye verticalmente a través de los tubos coalescedores, a través de los cuales fluye radialmente desde el interior de los cartuchos a través del medio coalescedor. Las partículas en la entrada se distribuyen en rangos desde $0,1\ \mu\text{m}$ hasta $300\ \mu\text{m}$, y luego de pasar por el medio coalescedor, estas aumentan su tamaño. Una de las ventajas de este tipo de interno, es que el reatrapamiento disminuye debido a que la velocidad del vapor se puede manipular al seleccionar el diámetro óptimo de los cartuchos.

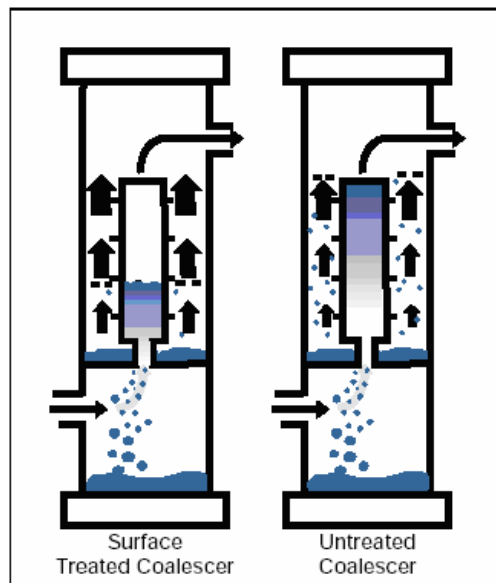


Fuente: Wines (2003).

Figura 23. Equipo coalescedor.

Existen también coalescedores de elevada eficiencia, construidos principalmente a partir de fibra de vidrio. Actualmente se está implementando el uso de **coalescedores de superficie tratada** químicamente para mejorar la coalescencia y se ha comprobado el aumento de los flujos permitidos, mejoras en el drenaje del líquido separado y la separación de partículas más pequeñas.

El tratamiento químico de la superficie, elimina las partículas líquidas de la parte superior del cartucho interno del coalescedor, tal y como se puede observar en la figura 24, razón por la cual se pueden permitir velocidades más elevadas, sin correr el riesgo de que se de el reatrapamiento.



Fuente: Wines (2003).

Figura 24. Esquema de un coalescedor con superficie tratada químicamente (izquierda) y otro coalescedor con superficie no tratada (derecha).

Dicho tratamiento químico, que se realiza a la superficie del coalescedor,

induce a la superficie características oleofóbicas e hidrofóbicas. Esta técnica desarrollada por **Pall Corporation** logra su efecto a través del ángulo de contacto de las partículas, por definición, el grado con el cual una partícula se difunde, es medido por el ángulo de contacto entre el líquido y el sólido, así cuando una en superficie no se crea la película líquida (las gotas se deforman menos), significa que el ángulo es mayor a 90° , mientras que cuando dicha superficie se moja, el ángulo tiene a ser 0° . El grado con que las partículas mojan las fibras del coalescedor, tiene un efecto significativo en el desempeño del mismo.

En los casos en los que el medio no ha sido tratado químicamente, las partículas líquidas se introducen en los poros de las paredes del medio coalescedor y forman una capa líquida hasta que dichos poros se llenan completamente, al aumentar la presión del vapor se produce la expulsión de la gota líquida, de tal manera, que ésta es fragmentada en partículas más pequeñas que pueden ser reatrapadas posteriormente.

Con este tratamiento superficial, no sólo se evita que este inconveniente suceda, sino que además, las gotas coalescen a lo largo de la pared con el mayor tamaño posible que pudieran haber obtenido a través del fenómeno de la coalescencia, cayendo posteriormente por gravedad sin que haya reatrapamiento.

En las superficies de los coalescedores no tratados, las gotas no mojan las

paredes de los poros, la sección capilar no se bloquea y por consiguiente no ocurre la atomización; además, el tratamiento químico de la superficie provee al coalescedor, propiedades tales que no existe el taponamiento, al prevenir que las partículas se adhieran a las fibras debido a las propiedades oleofóbicas e hidrofóbicas que le imparte. Esto alarga el servicio de vida de los coalescedores con tratamiento superficial, además de lograr que el coalescedor trabaje con menor volumen de retención (debido a que las partículas drenan rápidamente gracias a las bajas atracciones entre las fibras del coalescedor y las gotas de líquido formadas), lo permite que haya mayor espacio para el flujo de vapor y menores caídas de presión a través del dispositivo.

Dado que el principal efecto del tratamiento superficial es mejorar el drenaje de las partículas líquidas, se logra el manejo de mayores cantidades de líquido por unidad de área en el dispositivo, se pueden tener mayores velocidades del vapor en el recipiente (minimizando el diámetro del mismo) y se producen menores caídas de presión.

II.3.2 Modelado computarizado

En los últimos tiempos, los problemas presentados en los separadores líquido-vapor, han derivado la necesidad de perfeccionar el dimensionamiento de estos equipos, para esto, la mayoría de empresas que fabrican separadores líquido-vapor, hacen uso de programas de computación para modelar el patrón de flujo dentro de los recipientes, predecir las velocidades y obtener los perfiles de

presión. Una de las herramientas más utilizadas es el CFD. Tal y como se expuso anteriormente, TECHNIP (2003), recomienda el uso de simulaciones CFD para equipos de separación que operan a condiciones críticas (presiones mayores a 435 psig).

Computational Fluid Dynamics (CFD) es una herramienta matemática capaz de simular una amplia gama de flujos de diversos fluidos. Varios programas de CFD integrados han sido empleados en el estudio del flujo en separadores, y los efectos producidos en estos recipientes debido a la configuración de las boquillas de entrada, los distribuidores de flujo, los internos, las boquillas de salida, la formación del flujo de avance. (Frankiewicz, et al., 2002).

En las versiones más actualizadas de este tipo de programas, se utilizan modelos multifásicos avanzados para seguir las trayectorias de burbujas de vapor, gotas de condensados y hasta de partículas sólidas. Esto trae como beneficios, la incorporación de mejoras al diseño sin la necesidad de construir los equipos y de hacer pruebas extensas para probar los modelos pilotos.

II.4 Antecedentes

Estudios y Proyectos Ditech, S.A., solicitó la elaboración del Estado del Arte de las tecnologías, mejoras, patentes, y nuevas tendencias que se utilizan actualmente en el mundo para minimizar el *carryover* en separadores líquido-vapor, debido a que la compañía no posee información sobre los adelantos tecnológicos relativos este tema

actualmente.

II.5 Marco referencial

II.5.1 Resumen de la empresa DITECH, S.A

Estudios y Proyectos DITECH, S.A es “una empresa consultora dedicada a la ingeniería, procura y construcción de proyectos integrales, orientados hacia los sectores Petrolero, Petroquímico, Gas, Industrias Básicas, Naval, Portuario, Industrial, Químico, Transporte e Infraestructura... [quienes ofrecen] servicios de alta calidad, capacidad tecnológica, abarcando todas las fases de desarrollo de los proyectos”. (DITECH, 2005).

II.5.2 Proyecto Acondicionamiento de Gas en Fuentes de Producción (AGFP)

En una consultora de ingeniería, todo proyecto de diseño incluye un estudio entre los cuales se puede encontrar la ingeniería conceptual, la ingeniería básica o la ingeniería de detalle (ver tabla 32 en el apéndice F). Tal y como se explicó en el capítulo I, DITECH, S.A entregó a PDVSA, en el primer semestre del presente año, la ingeniería básica del proyecto AGFP, con la finalidad de minimizar la formación de condensados de hidrocarburos y agua, en los gasoductos de recolección que transportan el gas natural de la red norte en el Distrito Monagas.

Según la información recopilada en el proyecto AGFP, bs diferentes gasoductos de recolección que transportan actualmente el gas desde las Estaciones de Flujo (Santa Bárbara, Carito y Musipán y los Complejos Operativos Tejero y Amana)

hasta el Centro Operativo Muscar, para su procesamiento y posterior transferencia y distribución, se encuentran distribuidas en tres redes de acuerdo al nivel de presión que manejan. La red de 1200 psig lleva el gas de separación de 1200 psig desde las Estaciones de Flujo y Plantas Compresoras hasta Muscar; las redes de 450 y 60 psig manejan el gas de estos niveles de separación desde las Estaciones de Flujo interconectándolas con las Plantas Compresoras (Amana, Tejero y Muscar).

El proyecto AGFP consistió, entre otras cosas, en la ingeniería básica de:

II.5.2.1. Planta de Refrigeración Mecánica con Propano

En el proceso de recuperación de líquidos mediante refrigeración con propano, el gas proveniente del depurador de producción de 60 psig de la respectiva Estación de Flujo, es enviado hacia un intercambiador gas/gas donde es preenfriado, antes de ingresar a un chiller de propano, perteneciente al Paquete de Refrigeración con Propano.

El gas de proceso a la salida del chiller disminuye su temperatura, condensando los hidrocarburos más pesados, los cuales son recuperados en un *separador de gas de salida*. La corriente gaseosa a la salida del separador ingresa al intercambiador gas/gas, donde entra en contacto con la corriente de gas de alimentación, aumentando su temperatura para su posterior incorporación al gasoducto de 60 psig.

Por otra parte, los condensados del separador, son enviados por control de nivel

y a través de un orificio de restricción, hacia un *separador de baja presión*. Este recipiente maneja también los líquidos generados en el separador de gas de salida de la Planta de Enfriamiento con Aire del Gas del nivel de 450 psig de la misma Estación de Flujo. El gas de salida del separador de baja presión, será destinado a un futuro sistema cerrado de alivio de la Estación de Flujo, mientras sirve de variable para controlar la presión del equipo. El líquido de fondo, agua e hidrocarburos, será dirigido al sistema de condensados ECACP de PDVSA.

II.5.2.2. Planta de Enfriamiento por Aire

En el proceso de enfriamiento por aire, el gas proveniente de los depuradores de producción de 450 psig de la respectiva Estación de Flujo es preenfriado en unos intercambiadores gas/gas. Posteriormente, este gas entra a un aéroenfriador para reducir aun más su temperatura y de esa forma condensar el agua y los hidrocarburos presentes en la corriente de alimentación.

Más detalladamente, el gas que sale del enfriador por aire entra a un *separador de salida*, para retirar los condensados formados por el enfriamiento. El gas de salida de esta unidad es utilizado para preenfriar la corriente de alimentación a la planta en el propio intercambiador gas/gas, antes de incorporarse al sistema de transferencia de gas de 450 psig, con destino hacia la Planta Compresora.

Los condensados de mediana presión serán enviados mediante control de nivel en el separador, y a través de un orificio de restricción, hacia el *separador de baja presión*, localizado en la Planta de Refrigeración Mecánica con Propano

de la misma Estación de Flujo, dedicado al manejo de los líquidos de los nuevos procesos a instalar para acondicionar el gas de los niveles de 450 psig y 60 psig. El destino final de los líquidos será el sistema de inyección de agua (PIA) de PDVSA.

En el apéndice G, se pueden observar los diagramas de flujo de procesos de las plantas anteriormente descritas.

El proyecto solicitado tuvo como objetivo solventar la problemática asociada a la condensación de agua e hidrocarburos en los gasoductos, que impacta directamente sobre la operación y la capacidad de transferencia de gas natural en la red de PDVSA del Distrito Norte, Monagas. Esta problemática, se debe (entre otras razones), al arrastre de líquido presentado frecuentemente en los separadores líquido-vapor en los procesos de separación.

II.5.3 Carryover en la red norte de PDVSA

Según Torres (2005), el estudio aquí presentado, obedece a que en todas las estaciones de flujo y descarga de PDVSA en Oriente, el arrastre de líquido ha aumentado en gran escala, ya que frecuentemente, se encuentra abundante presencia de líquido en las tuberías de gas, lo que permite inferir que existe un excesivo arrastre de líquido a la salida de los separadores líquido-vapor.

El monitoreo y control de arrastre en las Estaciones de Flujo del Norte de Monagas ha adquirido gran importancia motivado a las fallas recurrentes que han tenido los equipos de compresión ubicados en las Plantas Tejero, Amana y Muscar por la presencia de líquidos y sólidos en el gas de succión. Las paradas de estos equipos afectan el manejo de gas del Distrito y generan la quema de gas rico que puede ser comprimido (Blanco, 2002).

Con la realización del Estado del Arte sobre las tecnologías implementadas actualmente en el mundo para minimizar el arrastre de líquidos en la corriente gaseosa de salida en los separadores líquido-vapor, se pretende entregar un anexo al proyecto AGFP, en el cual se identificarán y determinarán, como inciden las condiciones de operación, los parámetros de dimensionamiento, los internos y la instrumentación en los separadores diseñados, además de realizar una investigación que resuma las diferentes alternativas que se implementan hoy en día (a nivel mundial) por diversas empresas para solventar esta situación.

II.5.4 Evaluación de los separadores líquido-vapor

La operación a que se refiere este proyecto, frecuentemente se ve desmejorada, por el arrastre de líquidos que ocurre, en la corriente de vapor en el tope de los separadores, lo cual puede dañar severamente equipos aguas abajo en la línea de gas, además de tener un impacto directo indeseable, en la operación y capacidad de transferencia del gas natural de la red.

La investigación aquí presentada fue dedicada al estudio de los separadores de gas de salida diseñados para cada estación de flujo. Los separadores que se estudiarán, fueron diseñados en orientación vertical, con una placa deflectora de 90° en la entrada, una placa rompe vórtice en la sección de recolección del líquido y un eliminador de neblina tipo malla en el tope del separador; los resultados experimentales señalan que esta solución no es suficiente o que los internos no están trabajando eficientemente, razón por la cual se considera conveniente estudiar la corrección de estas deficiencias, para mejorar el proceso y producir un

beneficio económico al cliente.

Los separadores evaluados fueron diseñados para las Plantas de Refrigeración Mecánica con Propano del Gas de Nivel 60 psig y las Plantas de Enfriamiento por Aire del Gas de Nivel 450 psig para las Estaciones de Flujo Carito, Musipán y Santa Bárbara. En cada una de las tres (3) estaciones de flujo hay un separador de gas de salida para el gas de nivel de 60 psig y un separador de gas de salida para el gas de nivel de 450 psig, siendo estudiados en total seis (6) separadores líquido-vapor. Las condiciones de operación de los separadores diseñados para cada una de las plantas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 21. Condiciones de operación de las Plantas de Refrigeración Mecánica con Propano del Gas de Nivel de 60 psig y las Plantas de Enfriamiento con Aire del Gas de Nivel de 450 psig de todas las Estaciones de Flujo.

| Planta | Refrigeración Mecánica con Propano del Gas de 60 psig | | | Planta de Enfriamiento por Aire del Gas del nivel 450 psig | | |
|---|---|---------|---------------|--|---------|---------------|
| | Carito | Musipán | Santa Bárbara | Carito | Musipán | Santa Bárbara |
| Flujo de diseño del vapor (MMPCED) | 20 | 36,4 | 6 | 76 | 63,39 | 5 |
| Flujo de diseño del líquido (BPD) | 70 | 61,9 | 37,5 | 100 | 51 | 26 |
| T (°F) | 149 | 134.8 | 130 | 166 | 153 | 138 |
| P (psig) | 87 | 96 | 72.2 | 474 | 506 | 468 |

Fuente: Elaboración propia a partir de la información del proyecto AGFP.

En el proyecto AGFP, se utilizaron los siguientes criterios de diseño para evitar el arrastre de líquidos:

- 0,1 gal / MMPCE, según el GPSA (1998).
- En la sección de separación líquido-vapor, en caso de requerir gotas menores a 150 μm en la salida, se especificó un eliminador de neblina tipo malla.
- Se utilizaron recipientes verticales por manejar mezclas con alta relación en flujo másico gas-líquido (mayor cantidad de vapor que de líquido).

En el capítulo III, se presentan los procedimientos utilizados para realizar la evaluación de los separadores, y en el capítulo IV se exponen los resultados obtenidos de la evaluación realizada a los separadores aquí descritos.

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

III.1 Tipo de investigación

Según la metodología de la investigación holística, se llevó a cabo un estudio de tipo **exploratorio**, en el cual se buscó información sobre el *arrastre de líquidos* en los separadores líquido-vapor y se realizó el Estado del Arte de las tecnologías aplicadas actualmente en el mundo, para corregir el problema anteriormente mencionado.

La segunda etapa, supuso la conceptualización del tema, a través de la ejecución de una investigación de tipo **analítica**, en la cual se examinaron los factores que posiblemente están involucrados en tal fenómeno. Fue igualmente conveniente realizar una investigación **evaluativa**, que tuvo como finalidad, determinar la aptitud de los separadores líquido-vapor diseñados, con el propósito de minimizar la problemática estudiada, para así conocer, si éstos cumplían con los requisitos indispensables para corregir la situación.

Una vez finalizado el estudio del Estado del Arte y la evaluación de los separadores diseñados para la ingeniería básica del proyecto AGFP, se llevó a cabo una investigación **comparativa**, cuyo objetivo principal fue contrastar ambos resultados, que sirvieron para hacer algunas recomendaciones sobre el diseño de los equipos estudiados, de acuerdo a las tendencias actuales, de forma tal, que cumplieran acertadamente, con el aumento de la eficiencia, en el proceso de separación mecánica; finalmente esto constituyó una investigación **proyectiva**.

III.2 Diseño de investigación

El estudio del Estado del Arte realizado en base a las diversas fuentes de información, constituyó la base fundamental para el entendimiento de la situación que se presenta en las unidades estudiadas y de cómo hay que enfrentar el problema. Las fuentes de información utilizadas fueron: documentos técnicos, manuales de diseño de ingeniería, libros, publicaciones científicas, y datos secundarios,¹ que constituyeron el marco teórico del tema de investigación, y que, según el tipo de las fuentes de información, se pudo definir como un diseño **documental**.

Desde la perspectiva de temporalidad, el tipo de diseño en el que se fundamentó el tema desarrollado, se definió como **transeccional**, debido a que el Estado del Arte se sustentó en tecnologías modernas y tendencias actuales; mientras que en función del manejo de las variables, el diseño de la investigación fue **no experimental**, ya que se fundamentó en el estudio de un fenómeno observado y no provocado.

III.3 Variables y operacionalización

En la evaluación de los separadores líquido-vapor, los cuales deben cumplir con ciertas normas y criterios de diseño preestablecidos, una de las variables más importantes fue la velocidad del vapor. Esta depende de diversos factores, conocidos como *dimensiones de la variable*² entre las que se encontraron, la densidad del

¹ Los **datos secundarios** son registros que provienen de la práctica y han sido obtenidos por otros investigadores o instituciones.

² Las **dimensiones** son los factores de los cuales es función dicha variable, estos pueden ser medidos por separado y en conjunto forman la variable.

líquido y la densidad del vapor, el coeficiente de arrastre y el diámetro de partícula, o el factor de carga (según sea el caso). Otra variable de gran importancia fue la configuración del separador, cuyas características principales estuvieron determinadas por el flujo de líquido y vapor que maneja la unidad y por la tendencia de la mezcla a formar espumas en la misma.

Con respecto a los dispositivos internos, que presentan mayor incidencia en esta investigación, se les pudo dividir en dos categorías: internos de entrada e internos de coalescencia; las características consideradas fueron: el cambio de momentum que se desea lograr para los primeros, y para los segundos el diámetro de partícula a separar y la eficiencia de separación requerida. Por último, fueron objeto de estudio las condiciones de operación (flujo, presión y temperatura) de los separadores líquido-vapor y la instrumentación

III.4 Unidad de estudio y población

Las unidades de estudio de la presente investigación, fueron los seis separadores de gas de salida diseñados para las plantas de Refrigeración Mecánica con Propano y las plantas de Enfriamiento por Aire de las Estaciones de Flujo Carito, Musipán y Santa Bárbara, todas ellas en el Estado Monagas, Venezuela.

A continuación se presentan los datos de cada uno de los recipientes.

III.4.1 Separadores líquido-vapor de la Estación de Flujo Carito

En el apéndice G.1 se puede encontrar el diagrama de flujo de la Estación de Flujo Carito. En este diagrama se observan los separadores de gas de salida, el recipiente

V-601, ubicado en la Planta de Refrigeración Mecánica con Propano y el V-301 ubicado en la Planta de Enfriamiento por Aire. En los apéndices H.1 y H.2 se muestran las hojas de datos de éstos separadores respectivamente.

III.4.2 Separadores líquido-vapor de la Estación de Flujo Musipán

En el apéndice G.2 se puede encontrar el diagrama de flujo de la Estación de Flujo Musipán. En este diagrama se observan los separadores de gas de salida, el recipiente V-701 ubicado en la Planta de Refrigeración Mecánica con Propano y el V-401 ubicado en la Planta de Enfriamiento por Aire. En los apéndices H.3 y H.4 se muestran las hojas de datos de éstos separadores respectivamente.

III.4.3 Separadores líquido-vapor de la Estación de Flujo Santa Bárbara

En el apéndice G.3 se puede encontrar el diagrama de flujo de la Estación de Flujo Santa Bárbara. En este diagrama se hallan los separadores de gas de salida, el recipiente V-801, ubicado en la Planta de Refrigeración Mecánica con Propano y el separador V-501 ubicado en la Planta de Enfriamiento por Aire. En los apéndices H.5 y H.6 se muestran las hojas de datos de éstos separadores respectivamente.

III.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Los datos recolectados provinieron del proyecto realizado por DITECH, S.A. bajo el nombre de Acondicionamiento de Gas en Fuentes de Producción (AGFP), el cual consistió, entre otras cosas, en la ingeniería básica de las plantas mencionadas en el punto III.4.

En el diseño realizado para AGFP, como en todo proyecto de ingeniería desarrollado hoy en día, fue ineludible la utilización de programas de simulación de procesos químicos, como herramienta de apoyo que facilita el cálculo de las unidades de procesos y que produce resultados óptimos.

También se utilizaron las hojas de cálculo del Departamento de Procesos de DITECH, S.A., para realizar el diseño de los separadores líquido-vapor, basados en los criterios de diseño (establecidos por PDVSA) y con el apoyo de los conocimientos técnicos y científicos del ingeniero, dando como resultado el complemento final del diseño del equipo y/o proceso.

III.6 Procedimiento metodológico

III.6.1. Procedimiento metodológico para realizar el Estado del Arte

Cuando se va a realizar una investigación, como se explicó anteriormente, una de las primeras etapas para su ejecución es la revisión del Estado del Arte sobre el tema que se va a investigar. En la búsqueda de la información necesaria para realizar el Estado del Arte, se establecieron los recursos o fuentes a ser consultadas, y posteriormente se realizó la revisión de las mismas, etapa que se desarrolló en dos fases, siguiendo los períodos descritos por Naranjo, et al. (2003):

III.6.1.1 Fase Heurística

La fase heurística, es la etapa en la que se realizó la búsqueda y selección de las fuentes de información que fueron investigadas. Para el presente estudio, se

recopiló información a partir de revistas científicas especializadas en el área, proyectos realizados por empresas, información en la web, libros especializados sobre el tema, tesis universitarias y publicaciones específicas del tema hechas por autores individuales, además de la información obtenida de las empresas que fabrican este tipo de unidades y los dispositivos internos que pueden ser instalados en las mismas.

III.6.1.2 Fase Hermenéutica

La fase hermenéutica, es el período durante el cual las fuentes seleccionadas fueron analizadas, se comentaron y se catalogaron, de acuerdo a la relevancia de la información encontrada para la investigación realizada. En esta etapa se seleccionó la información imprescindible.

Una vez culminada la fase hermenéutica, se establecieron los criterios para la metodología a utilizar en la evaluación de los separadores líquido-vapor del proyecto AGFP.

III.6.2. Procedimiento metodológico para realizar la evaluación de los separadores líquido-vapor del proyecto AGFP

La metodología seguida en la evaluación de los separadores que conforman la unidad de estudio de la presente investigación, se basó en la teoría de asentamiento gravitatorio y el estudio de las variables incidentes en el carryover, expuestos en el capítulo anterior, además de la metodología propuesta por Zabala (2005) para la evaluación de tales recipientes.

A partir de esto, el procedimiento seguido se resume a continuación:

III.6.2.1 Configuración geométrica del separador líquido-vapor

Con el propósito de confirmar que la configuración escogida en el diseño realizado de los separadores en el proyecto AGFP fue la correcta, se compararon los flujos máxicos³ de las fases vapor y líquido.

Posteriormente, se analizaron los diversos factores que tal y como se explicó en la sección II.1.5.2, influyen en la elección de una orientación específica.

III.6.2.2 Verificación del tiempo de residencia del líquido según los niveles de líquido en los separadores

Para verificar que la población de separadores estudiada cumpliera con los criterios preestablecidos para los tiempos de residencia del líquido se calcularon los tiempos de retención de la siguiente manera:

- a) Se calculó el área transversal del recipiente como:

$$A_T = \frac{p(D)^2}{4} \quad \text{Ec. 27}$$

- b) Se calculó el tiempo de residencia como:

$$t_{Rn} = \frac{H_n \times A_T}{Q_L} \quad \text{Ec. 28}$$

³ Debido a que para ambas fases, en las hojas de datos de los separadores líquido-vapor del proyecto AGFP se encuentran reportados los flujos volumétricos, los datos de los flujos máxicos se tomaron del reporte de las corrientes arrojado por las simulaciones realizadas. Estos valores se pueden observar en las tablas de resultados de la sección IV.5.

III.6.2.3 Verificación del arrastre de líquido en el vapor de salida de los separadores

Para verificar el arrastre de líquidos en el vapor de salida de los separadores diseñados en la ingeniería básica de AGFP, se calcularon los valores de la velocidad crítica y la velocidad del vapor en el separador, para posteriormente compararlas.

Para el cálculo de las velocidades se utilizó el siguiente procedimiento:

- a) Se calculó la velocidad del vapor a partir de la ecuación (19).
- b) Se calculó la velocidad crítica a partir de la ecuación (17).

Para el cálculo del factor de carga “K”, se utilizó el valor de 0,35 ft/s reportado para separadores verticales con eliminadores de neblina tipo mallas (interno diseñado en los separadores evaluados) y se corrigió según la presión de operación a partir de los valores de la tabla 18, tal y como se expuso en la sección II.2.2.4.

CAPITULO IV

ANÁLISIS Y RESULTADOS

A continuación se presentan y se analizan los resultados obtenidos de la evaluación de los separadores líquido-vapor descritos en la sección III.4.

IV.1 Tecnologías y tendencias actuales para evitar el arrastre de líquido en los separadores líquido-vapor

A partir de la información recopilada para el Estado del Arte, se puede decir que actualmente se vive una **nueva era tecnológica**, en la que la principal innovación en los procesos de separación mecánica, la constituye la tecnología ciclónica. Además las tendencias actuales incluyen tanto el tratamiento químico de las superficies de los dispositivos internos, como el uso de programas de computación para modelar el comportamiento de los fluidos en el recipiente y los patrones de velocidades de las fases.

IV.2 Dispositivos internos de los separadores líquido-vapor

En cuanto a los dispositivos internos que se instalan en los separadores para mejorar la eficiencia de separación, se pudo verificar que ciertamente estos aparatos pueden ser beneficiosos, siempre y cuando se diseñen correctamente, ya que de lo contrario pueden llegar a ocasionar mayor arrastre de líquidos u otros problemas operacionales, que los que habrían habido si no se hubiesen instalado.

Los internos que se instalan en la sección de entrada, son primordiales y aunque muchas veces no se les otorga la importancia debida, se encontró que los patrones de flujo, velocidades y la distribución de las fases en el separador, dependerán del

tratamiento que reciba la mezcla alimenta al ponerse en contacto con estos internos. Además, estos dispositivos deben soportar el impacto de entrada, disipar la energía y permitir una separación inicial, evitando la atomización del líquido en partículas muy pequeñas o la formación de espumas, factor crucial en el posterior funcionamiento del separador.

Los dispositivos internos que se colocan en la sección de recolección, tienen una gran importancia en cuanto a la disminución del arrastre de vapor en la corriente de salida líquida, la formación del flujo de avance y la formación de vórtices, que interrumpen el funcionamiento correcto de la unidad, afectando la eficiencia del proceso de separación. Sin embargo, los dispositivos estudiados con mayor detenimiento, fueron los dispositivos de coalescencia, ya que éstos son los internos que afinan finalmente la eficiencia de la separación.

Se encontró que los dispositivos en la zona de coalescencia, han avanzado mucho en los últimos tiempos, se han desarrollado tecnologías innovadoras para hacer que las tradicionales mallas y venas recolecten partículas líquidas más pequeñas, manejen mayores flujos, y permitan mayores velocidades del vapor reduciendo así el área del recipiente para disminuir los costos. Se han desarrollado los ciclones, que han demostrado elevadas eficiencias, desempeños libre de espumas y que resultan en unidades más compactas, perfectas para utilizar en facilidades costa afuera; aunque tienen restricciones en cuanto al manejo de *slugs* y que producen mayores caídas de presión, no obstante esta tecnología aún se encuentra en una etapa de progreso.

IV.3 Incidencia de las condiciones de operación en el *carryover*

En cuanto a las condiciones de operación del proceso, el parámetro más influyente es el flujo que manejará la unidad. El caudal manejado indicará inicialmente el tipo de separador a diseñar y la relación de las fases guiará inicialmente, la selección de la orientación del separador.

No obstante, la presión y la temperatura no dejan de ser parámetros importantes en el desempeño del separador, ya que cuando alcanzan valores críticos los resultados esperados según la teoría varían en alto grado y es necesario hacer uso de herramientas de computación que ayuden a comprender mejor el proceso, antes de pasar a la fase de construcción con sus implicaciones económicas.

Además se debe tener en cuenta que los valores de presión y temperatura, influirán en la deposición de asfaltenos y parafinas, al disminuir su solubilidad en el medio.

IV.4 Efecto de la instrumentación del equipo en el *carryover*

Con respecto a la instrumentación diseñada en las unidades, tienen gran importancia, el control del nivel del líquido, ya que el aumento de este parámetro disminuye la eficiencia de la separación reduciendo el espacio de la sección de asentamiento y promoviendo la formación de espumas, además de crear problemas operacionales en el recipiente.

IV.5 Evaluación de la configuración de los separadores líquido-vapor

Los separadores líquido-vapor estudiados, son de configuración cilíndrica y todos fueron diseñados con orientación **vertical**; a continuación se muestran los flujos de líquido y vapor manejados en los recipientes, y las relaciones másicas de las fases.

Tabla 22. Flujos másicos de los separadores de la Estación de Flujo Carito.

| Planta | Separador | Q _L (lb/h) | Q _V (lb/h) | Relación vapor-líquido |
|------------------------------------|-----------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| Refrigeración Mecánica con Propano | V-601 | 1.006 | 70.750 | 70,3 |
| Enfriamiento por Aire | V-301 | 1.453 | 185.600 | 128 |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de los separadores del proyecto AGFP.

Tabla 23. Flujos másicos de los separadores de la Estación de Flujo Musipán.

| Planta | Separador | Q _L (lb/h) | Q _V (lb/h) | Relación vapor-líquido |
|------------------------------------|-----------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| Refrigeración Mecánica con Propano | V-701 | 900,4 | 99.970 | 111 |
| Enfriamiento por Aire | V-401 | 740,9 | 151.200 | 204 |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de los separadores del proyecto AGFP.

Tabla 24. Flujos másicos de los separadores de la Estación de Flujo Santa Bárbara.

| Planta | Separador | Q _L (lb/h) | Q _V (lb/h) | Relación vapor-líquido |
|------------------------------------|-----------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| Refrigeración Mecánica con Propano | V-801 | 416,1 | 22.280 | 53,5 |
| Enfriamiento por Aire | V-501 | 254,8 | 12.250 | 48,1 |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de los separadores del proyecto AGFP.

Se puede observar que debido a que todos los separadores tienen elevadas relaciones vapor-líquido, la configuración vertical fue escogida acertadamente, ya que los recipientes manejarán grandes cantidades de vapor.

IV.6 Verificación del tiempo de residencia de líquido según los niveles del separador

Se verificó que los tiempos de residencia obtenidos en la evaluación de los separadores, reportados en las tablas que se presentan a continuación, cumplen con los límites propuestos en la bases y criterios del cliente para el proyecto AGFP (ver tabla 31 en el apéndice E).

Tabla 25. Tiempo de residencia del líquido en cada nivel de los separadores de la Estación de Flujo Carito.

| Planta | Separador | Tiempo de residencia en el nivel (min) | | | | |
|------------------------------------|-----------|--|-----------|-----------|-----------|------------|
| | | t_{HHLL} | t_{HLL} | t_{NLL} | t_{LLL} | t_{LLLL} |
| Refrigeración Mecánica con Propano | V-601 | 26 | 20 | 20 | 26 | 39 |
| Enfriamiento por Aire | V-301 | 25 | 19 | 19 | 25 | 38 |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de los separadores del proyecto AGFP.

Tabla 26. Tiempo de residencia del líquido en cada nivel de los separadores de la Estación de Flujo Musipán.

| Planta | Separador | Tiempo de residencia en el nivel (min) | | | | |
|------------------------------------|-----------|--|-----------|-----------|-----------|------------|
| | | t_{HHLL} | t_{HLL} | t_{NLL} | t_{LLL} | t_{LLLL} |
| Refrigeración Mecánica con Propano | V-701 | 47 | 35 | 35 | 47 | 71 |
| Enfriamiento por Aire | V-401 | 39 | 29 | 29 | 39 | 58 |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de los separadores del proyecto AGFP.

Tabla 27. Tiempo de residencia del líquido en cada nivel de los separadores de la Estación de Flujo Santa Bárbara.

| Planta | Separador | Tiempo de residencia en el nivel (min) | | | | |
|------------------------------------|-----------|--|-----------|-----------|-----------|------------|
| | | t_{HHLL} | t_{HLL} | t_{NLL} | t_{LLL} | t_{LLLL} |
| Refrigeración Mecánica con Propano | V-801 | 25 | 18 | 18 | 25 | 37 |
| Enfriamiento por Aire | V-501 | 32 | 24 | 24 | 32 | 48 |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de los separadores del proyecto AGFP.

IV.7 Verificación del arrastre de líquido en el vapor de salida de los separadores

Con respecto al arrastre de líquidos en los separadores verticales estudiados, el parámetro evaluado fue la velocidad del vapor permisible en el recipiente.

Tabla 28. Velocidad crítica y velocidad del vapor en los separadores de la Estación de Flujo Carito.

| Planta | Separador | n_v (ft/s) | n_c (ft/s) |
|------------------------------------|-----------|--------------|--------------|
| Refrigeración Mecánica con Propano | V-601 | 3,70 | 3,53 |
| Enfriamiento por Aire | V-301 | 1,82 | 1,58 |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de los separadores del proyecto AGFP.

Tabla 29. Velocidad crítica y velocidad del vapor en los separadores de la Estación de Flujo Musipán.

| Planta | Separador | n_v (ft/s) | n_c (ft/s) |
|------------------------------------|-----------|--------------|--------------|
| Refrigeración Mecánica con Propano | V-701 | 3,80 | 3,81 |
| Enfriamiento por Aire | V-401 | 1,80 | 1,53 |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de los separadores del proyecto AGFP.

Tabla 30. Velocidad crítica y velocidad del vapor en los separadores de la Estación de Flujo Santa Bárbara.

| Planta | Separador | n_v (ft/s) | n_c (ft/s) |
|------------------------------------|-----------|--------------|--------------|
| Refrigeración Mecánica con Propano | V-801 | 2,51 | 3,33 |
| Enfriamiento por Aire | V-501 | 0,36 | 1,30 |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de los separadores del proyecto AGFP.

En contraposición a lo esperado, se obtuvieron valores de velocidades del vapor mayores a las velocidades críticas, en los recipientes V-601, V-301 y V-401 (ver tablas 28 y 29) y aunque el valor de la velocidad del vapor del recipiente V-701 (tabla 29), está por debajo del valor crítico, la diferencia se considera despreciable, por lo que se asumió que en este recipiente también ocurre el arrastre “teórico” de líquidos, de la misma manera que en los recipientes anteriormente mencionados. En los separadores de la Estación de Flujo Santa Bárbara (tabla 30) se observa que no existe “teóricamente” arrastre de líquidos.

Puede notarse que la diferencia en las velocidades comparadas no es muy elevada, por lo que se considera como solución, aumentar la velocidad del vapor permitida en el recipiente. Para esto, el factor de carga del eliminador de neblina necesitará tomar un valor más elevado, lo que se consigue con la instalación de venas de alta eficiencia en lugar de eliminadores de neblina tipo malla. Puede también considerarse el uso de programas de modelado CFD en los recipientes V-301 y V-401 ya que operan a presiones mayores a los 435 psig, para una comprensión más efectiva del comportamiento de la mezcla dentro del recipiente (TECHNIP, 2003).

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V.1 Conclusiones

- Se concluye que las variables que inciden en el arrastre de líquidos en los separadores líquido-vapor en base al procedimiento de diseño que se utiliza en el Departamento de Procesos de DITECH, S.A, son:

- ✓ La **relación másica líquido-vapor** influye directamente en la selección del tipo, configuración y orientación del separador.
- ✓ Valores muy bajos de la **velocidad del vapor**, resultan en mayor arrastre de partículas pequeñas, que pasan a través del interno de coalescencia sin ser interceptados; mientras que velocidades excesivas producirán la inundación de eliminadores tipo malla en el tope de la unidad. Además, la velocidad del vapor en el recipiente debe ser menor que la velocidad crítica o terminal para evitar el arrastre de líquidos aguas abajo del separador.
- ✓ El **diámetro de la partícula** seleccionado en separadores que no poseen internos instalados es crucial debido a que definirá el diseño, el costo y la eficiencia de la unidad. Seleccionar diámetros de partícula muy pequeños traerá como consecuencia grandes espacios requeridos para la retención de las partículas, aumentando el tamaño de los recipientes, y en consecuencia el diseño de las unidades es poco práctico y costoso.
- ✓ El **factor de carga del sistema** en recipientes que incluyen internos en su diseño, es un parámetro que define la velocidad permisible a manejar en el separador.
- ✓ El **coeficiente de arrastre** el cual dependerá de las propiedades físicas de la

mezcla a separar y del régimen de flujo dentro de la unidad.

- ✓ El **nivel del líquido**, parámetro que afecta la separación en recipientes horizontales, mientras que en configuraciones verticales, su control es menos crítico.
 - ✓ Los **tiempos de retención del líquido** en la sección de recolección, los cuales deben permanecer en los rangos establecidos según los criterios de diseño manejados, de manera que las fases puedan ser separadas antes de salir de la unidad.
 - ✓ Los **tiempos de retención del vapor** en la sección de asentamiento que deben ser superiores al tiempo de retención de las partículas líquidas en dicha sección, de manera que éstas no sean arrastradas por el vapor en su salida del recipiente.
 - ✓ La **formación de espuma** en el separador, que producirá el reatrapamiento del líquido separado en la fase vapor.
- Se encontró que las propiedades físicas de la mezcla que intervienen en el arrastre, son:
 - ✓ Las **densidades de las fases**, entre las cuales debe haber una diferencia significativa, ya que mientras más se asemejen los valores de estos parámetros, más difícil será la separación.
 - ✓ La **viscosidad del vapor**; debido a que mientras más elevado sea el valor de esta propiedad, más difícil será separar las partículas líquidas atrapadas en el vapor.

- ✓ La **viscosidad del líquido**, ya que a mayores viscosidades, aumentará el tiempo de residencia del líquido en el eliminador ocupando mayor el área del mismo, promoviendo la creación de caminos preferencial para el vapor y el aumento de la velocidad a través del extractor.
 - ✓ La **tensión superficial** del líquido, en la cual se basa la estabilidad de las partículas líquidas formadas, y de la cual dependerá la forma que éstas adoptan, afectando el análisis teórico realizado para establecer el procedimiento de diseño de los separadores.
- Se verificó la incidencia de los internos en el *carryover* según el tipo de dispositivos, encontrándose que:
 - ✓ Los internos diseñados para la sección de entrada son los responsables de la distribución de las fases en el separador y en consecuencia de la capacidad de separación inicial de la mezcla. A mejor separación inicial, mejor será el desempeño de los demás internos instalados en el recipiente.
 - ✓ Los internos colocados en la sección de recolección del líquido, evitan los problemas operacionales que influyen en el desempeño del recipiente como el *carryunder*, la formación de vórtices, de espumas y del flujo de avance.
 - ✓ Los internos de coalescencia son los encargados de afinar la separación lograda por asentamiento gravitatorio, por lo que su correcto funcionamiento es crucial en la disminución del arrastre de pequeñas partículas aguas abajo de los separadores.

- Igualmente se comprobó la incidencia de las condiciones de operación de los separadores líquido-vapor, obteniéndose que :
 - ✓ El efecto producido por valores críticos de la **presión** y **temperatura**, afectan el comportamiento de la mezcla y el diseño del recipiente. Además cambios en estas propiedades promueven la deposición de asfaltenos y parafinas, al disminuir la solubilidad de estos compuestos.
 - ✓ Las variaciones en los **flujos** de operación, afectan el desempeño de los internos instalados en la unidad, además de producir los *slugs* en el fondo del recipiente.

- Se verificó la importancia del **control de nivel** diseñado en los equipos, el cuales imprescindible, ya que en el caso del aumento en el nivel del líquido la eficiencia de separación se ve afectada directamente, al reducir el espacio de la sección de asentamiento y la formación de espumas en niveles más críticos, con las subsiguientes consecuencias; mientras que en el caso de la disminución, se producen problemas operacionales en el recipiente.

- Se elaboró el **Estado del Arte** de las tecnologías innovadoras y tendencias actuales en el campo de la separación física de mezclas líquido-vapor, encontrándose como principales avances el mejoramiento de las tecnologías tradicionales, el uso de la tecnología ciclónica, el tratamiento químico de la superficie de los internos de coalescencia y el uso de programas de computación para el modelado de fluidos multifásicos.

- Se evaluaron los separadores líquido-vapor diseñados para el proyecto *Acondicionamiento de Gas en Fuentes de Producción*, a fin se compararlos con la tecnología investigada y proponer mejoras en sus diseños. Se concluyó que aún en los nuevos diseños de los separadores de gas de salida, de las Estaciones de Flujo Carito y Musipán, existe arrastre teóricamente, razón por la que se proponen mejoras en estos recipientes.

V.2 Recomendaciones

V.2.1 Recomendaciones para el proyecto *Acondicionamiento de Gas en Fuentes de Producción*.

Para disminuir el arrastre de líquidos en el separador, teóricamente basta con lograr que la velocidad crítica sea mayor a la velocidad del vapor, por lo que se recomienda cambiar el tipo de internos de coalescencia diseñados en los recipientes, a fin de aumentar la velocidad permisible en el separador. Para esto se puede:

- Colocar un eliminador de neblina tipo *vane* antes del eliminador tipo malla diseñado, con la finalidad de aumentar el factor de carga del sistema y permitir mayores velocidades a través del eliminador de neblina, sin que aumente el arrastre de líquidos en la salida del vapor. Aún así debe estudiarse la interferencia en el espacio geométrico en el separador.
- También se puede colocar un eliminador de neblina tipo *vane* en lugar de un eliminar de neblina tipo malla, y en la salida del recipiente adaptar una malla tal y como lo propone AMISTCO Separation Products, Inc. (ver figura 27 en el

apéndice I).

V.2.2 Recomendaciones para Estudios y Proyectos DITECH, S.A.

Se debe tener en cuenta la información recolectada sobre la influencia de las variables de diseño, las propiedades físicas de la mezcla, las condiciones de operación y la instrumentación, en el procedimiento de diseño de separadores líquido-vapor del Departamento de Procesos de DITECH, S.A.

Así mismo es importante incluir la información recopilada sobre las nuevas tecnologías disponibles con respecto a los dispositivos internos de los separadores, y estudiar la inclusión del uso de los programas de modelado dinámico en el diseño de los separadores que operan a presiones por encima de 435 psig, según lo establecido por TECHNIP.

V.2.3 Recomendaciones generales

Se propone fomentar el estudio experimental del arrastre de líquidos en separadores líquido-vapor que manejan crudos venezolanos, a fin de confirmar las aseveraciones teóricas que se exponen en esta investigación. Además, se puede impulsar el estudio del tratamiento oleofóbico e hidrofóbico de las superficies de los internos de coalescencia, de manera que se pueda comprobar si es posible realizar dicha tecnología en el país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aker Kværner. (1997). [en línea]. Noruega. *Bulletin 5*. Disponible en: <http://www.akerkvaerner.com/NR/rdonlyres/7F1230E1-7742-44E5-BACC-260DC4881A7E/10197/CompactcycloneinletdeviceGSepCCII.pdf> [2005, 16 de Junio].
- Alonso, M. y Finn, E.J. (1995). *Física*. (edición única). LUGAR: Addison Wesley Iberoamericana. Pág. 82.
- Amistco Separation Products, Inc. (2004). *Technical Bulletins*. [en línea]. TX, U.S.A. Disponible en: <http://www.amistco.com/> [2005, 18 de Marzo].
- API (1989). Norma API 12J: *Specification for Oil and Gas Separators*. (7^a ed.) Apéndice C. (p. 14). (material electrónico).
- Arnold, K. (1999). *Two-Phase Oil and Separation*. En *Surface Production Operations*. (pp. 101 – 134). (2a ed). Vol. 1. Gulf Publishing Company.
- Baumeister, A. (s.f.). *Diseño de Plantas*. Manuscrito no publicado, Escuela de Ingeniería Química, Universidad Metropolitana. Caracas.
- Blanco, R. (2002) *Artículo técnico 28: Monitoreo y control de arrastre en Estaciones de Flujo del norte de Monagas*. [en línea]. Maracaibo: Ingenieros Consultores y Asociados C.A. Disponible en: <http://www.gas-training.com/club.html> [2005, 14 de Junio].
- BP (1980). *Vapor-liquid separators and surge drums*. *BP Handbook of chemical engineering calculations* (pp. 862-881)(Rev.1)(Vol.2). Dowsett, J. y Watson, M. Disponible en electrónico. British Petroleum Research Centre.

- Britannica (1997). [en línea]. IL, U.S.A. Disponible en: http://www.britannica.com/nobel/micro/88_96.html [2005, 7 de Abril].
- Campbell, J. (1976). *Separation equipment*. En *Gas conditioning and processing*. (pp.1-21). (8a. ed.). (Vol. 2). USA.
- Castellan, G. (1998). Fisicoquímica (2ª. Ed.). México: Addison Wesley Longman. Pág. 433.
- DITECH S.A. (2005). Programa de Inducción (p. 1). Gerencia de Recursos Humanos DITECH S.A
- Enhanced Separation Technology (2002). [en línea]. IL, U.S.A. Disponible en: <http://www.est-us.com/products.htm> [2005, 12 de Abril].
- Fabian, P.; Cusack, R.; Hennessey, P y Neuman, M. (1993). *Part I: Demystifying the selection of mist eliminators*. *Chemical Engineering*, 100(11), 148-156.
- Factory Direct Pipeline Products, Inc. (2005). [en línea]. NJ, U.S.A. Disponible en: <http://www.fdpp.com/mall/1tc.asp> [2005, 1 de Septiembre].
- Frankiewicz, T.; Browne, M. y Lee, C. (2001). *Reducing Separation Train Sizes and Increasing Capacity by Application of Emerging Technologies*. OTC 13215. Houston, U.S.A. Disponible en: <http://www.natcogroup.com/ConsultingResearch/Presentation/Publications/OTC-13215-2001.PDF> [2005, 10 de Junio].
- García, A. (2005) Departamento de Física Aplicada de la Universidad del País Vasco. Fluidos: Principio de Arquímedes. España. Disponible en:

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/estatica/arquimedes/arquimedes.htm>

[2005, 21 de Julio].

- GPSA (1998). *Separators and Filters*. G.P.S.A. *Engineering Data Book*. (pp. 7-1 a 7-15). (11^a, ed.) (Vol. 1). En electrónico. Oklahoma, U.S.A. Gas Processors Suppliers Association.
- Jekel, T.; Reindl, D. y Fisher, J. (2001). *Gravity Separator Fundamentals and Design*. En *IIAR 2001 Ammonia Refrigeration Convention & Exhibition*. California. U.S.A. Disponible en: <http://www.irc.wisc.edu/file.php?id=61> [2005, 4 de Marzo].
- Lieberman, N y Lieberman E. (2002). *Separators: Vapor-Hydrocarbon-Water. A working Guide to Process Equipment*. (pp. 341 - 353). Louisiana. McGraw Hill.
- Ludwig, E. (2001). *Mechanical Separations. Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*. (224 - 261). (3a. ed.) (Vol 1). Gulf Professional Publishing.
- Martínez, M. (2004). *Artículos técnicos*. [en línea]. Maracaibo: Ingenieros Consultores y Asociados C.A. Disponible en: <http://www.gas-training.com/club.html> [2005, 14 de Junio].
- Monnery, W. y Svrcek, W. (2000). *Analytical study of liquid/vaporseparation efficiency*. Calgary, Canadá. Disponible en: <http://www.ptac.org/env/dl/envp0102.doc> [2005, 7 de Abril].
- Naranjo, E. (2003). Seminario de Estudios de Usuarios, [en línea]. Antioquia.: Escuela Interamericana de Bibliotecología Universidad de Antioquia. Disponible

en: <http://docencia.udea.edu.co/bibliotecologia/seminario-estudios-usuario/unidad4/unidad4.html> [2005, 24 de Febrero].

- PDVSA (1991). Separadores Líquido - Vapor. Manual de Ingeniería de diseño: Guía de ingeniería. (Vol. 15). (Nº 90616.1.027). Venezuela: Petróleos de Venezuela S.A.
- PDVSA (1995a). Principios Básicos. Manual de diseño de proceso: Separación física. Tambores separadores. (Nº MDP-03-S-01). Venezuela: Petróleos de Venezuela S.A.
- PDVSA (1995b). Separadores líquido-vapor. Manual de diseño de proceso: Separación física. Procedimientos de diseño. (Nº MDP-03-S-03). Venezuela: Petróleos de Venezuela S.A.
- Peerless Mfg. Co. (s.f). [en línea]. TX, U.S.A. Disponible en: http://www.peerlessmfg.com/pdf/care_13vane_sep.pdf [2005, 25 de Mayo].
- Perry, R. y Green, D. (1999a). *Fluids and Particle Dynamics*. Perry's Chemical Engineering Handbook. (pp 6-50 a 6-54). U.S.A. McGraw – Hill. Disponible en electrónico.
- Perry, R. y Green, D. (1999b). *Phase Separation*. Perry's Chemical Engineering Handbook. (pp 14-81 a 14-94). U.S.A. McGraw – Hill. Disponible en electrónico.
- TECHNIP (2000). *Vessels/Drums/Separators (TG.00.01.00)*. Process Design Guidelines. Process Engineering. (pp. 1-37). Houston, USA.

- TECHNIP (2003). *Process Engineering Design Guide. Process Design Guide.* Manual de diseño no publicado. (pp. 8-13). (Capítulo 1. Sección 1. Libro 1.1.2). París, Francia.
- Torres, M (**mtorres@ditexsa.com**). (2005, 28 Febrero). RE: Anteproyecto pasante Unimet. Correo Electrónico enviado a: María Clara Omaña Pérez (**mariaclara312@yahoo.com**).
- Wines, T.; Lakhani, H. y Miles, W (2003). *High Efficiency Coalescers Increase On-Line Process Analyzer Sensor Reliability.* En Analysis Division 48th Annual Spring Symposium. Calgary, Canadá. Disponible en: <http://www.pall.com/pdf/GDS119STR.pdf> [2005, 26 de Mayo].
- Zabala, A. (2005). Revisión, re-definición y ampliación del programa ‘diseño de separadores’ de Inelectra S.A.C.A. Trabajo de grado, Ingeniería Química, Universidad Metropolitana, Caracas.

APÉNDICES

APÉNDICE A

NOMENCLATURA Y ABREVIACIONES

NOMENCLATURA

- A_P : Área de la partícula líquida (ft^2)
- A_T : Área transversal del separador (ft^2)¹
- $a(t)$: Aceleración de la partícula líquida en función del tiempo (ft/s^2)
- C_D : Coeficiente de arrastre (adim)
- D : Diámetro del recipiente (ft)
- D_P : Diámetro de la partícula líquida (ft) ²
- D_{PC} : Diámetro crítico de la partícula líquida (ft)
- F : Factor de corrección para el factor de carga horizontal (adim)
- F_B : Fuerza de flotación ($\text{lb}/\text{ft}\cdot\text{s}^2$)
- F_D : Fuerza de arrastre ($\text{lb}/\text{ft}\cdot\text{s}^2$)
- F_G : Fuerza de gravedad ($\text{lb}/\text{ft}\cdot\text{s}^2$)
- g : aceleración de gravedad (ft/s^2)
- H_n : Altura del nivel correspondiente de líquido (ft)
- H_V : Altura vertical desde la boquilla de entrada hasta el nivel del líquido (ft)
- K : Factor de carga del sistema (ft/s)
- K_{CR} : Constante de proporcionalidad (adim)
- K_H : Factor de carga del sistema para separadores horizontales (ft/s)
- K_V : Factor de carga del sistema para separadores verticales (ft/s)
- L : Longitud del separador (ft)
- L_B : Longitud de la base del separador (ft)
- L_E : Longitud efectiva del separador (ft)
- m_P : Masa de la partícula líquida (lb)
- P : Presión de diseño del separador (psig)³
- Q_L : Flujo de líquido en el separador (ft^3/min)⁴
- Q_V : Flujo de vapor en el separador (ft^3/s)⁵

¹ Aplica en el caso estudiado (separador verticales).

² En el caso de las tablas, los diámetros de las partículas a separar están indicados como valores en micrones, ya que en cuanto a criterios son más utilizadas estas unidades. Sin embargo, en todas las ecuaciones, éste parámetro debe ser introducido en las unidades indicadas en esta sección.

³ En el caso de la tabla 18, se utilizan unidades absolutas lo que resulta en unidades de psia.

⁴ En el caso de tablas, se indica si se refiere al flujo másico o volumétrico de la fase y sus respectivas unidades.

Re: Número de Reynolds (adim)
 t_R : Tiempo de retención del líquido (min)
T: Temperatura (°F)
 v_C : Velocidad crítica del vapor (ft/s)
 v_D : Velocidad de diseño del vapor (ft/s)
 v_t : Velocidad terminal (ft/s)
 v_V : Velocidad del vapor (ft/s)
V: Volumen del líquido dentro del separador (ft³)
 V_P : Volumen de la partícula líquida (ft³)
We: Número de Weber (adim)
 W_L : Tasa de flujo de la fase líquida (lb/s)
 W_V : Tasa de flujo de la fase vapor (lb/s)

Símbolos griegos

μ_V : Viscosidad del vapor (lb/ft·s)
 ρ_L : Densidad del líquido (lb/ft³)
 ρ_V : Densidad del vapor (lb/ft³)
 σ : Tensión superficial del líquido (lb f/ft)

ABREVIACIONES

MMPCE: Millones de pies cúbicos estándar

BPD: U.S Barriles por día

⁵ En el caso de tablas, se indica si se refiere al flujo másico o volumétrico de la fase y sus respectivas unidades.

APÉNDICE *B*

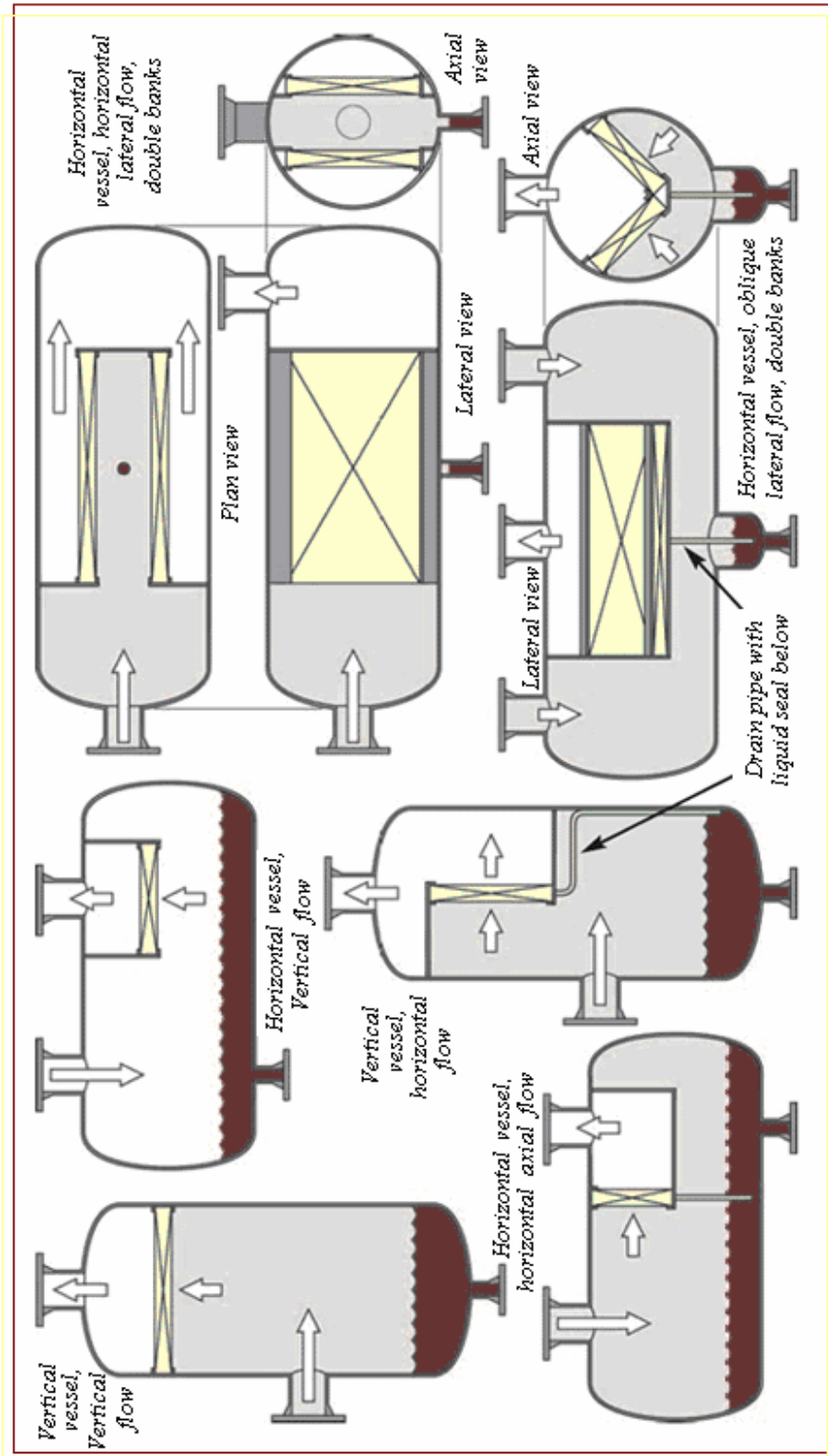
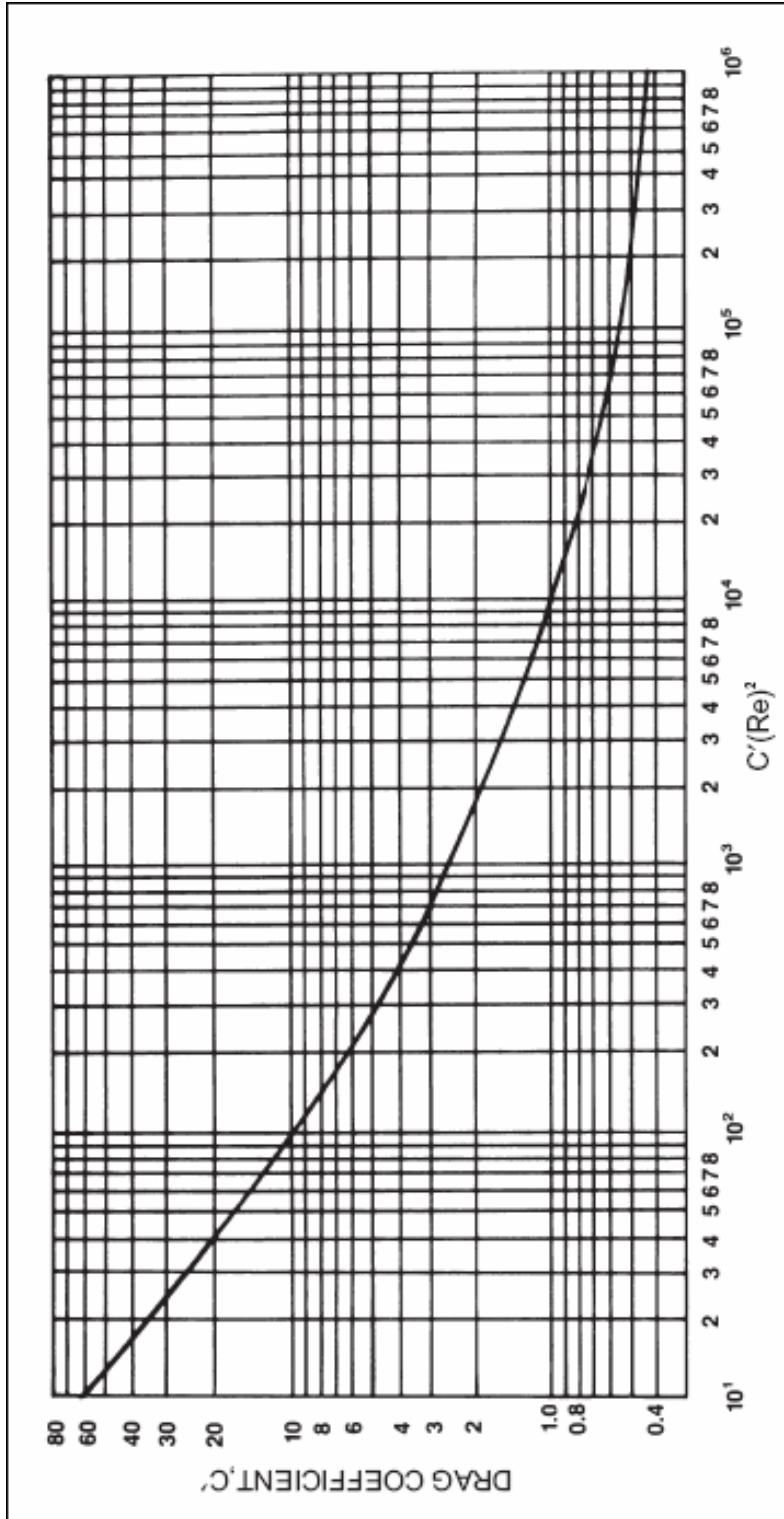


Figura 25. Configuración de los eliminadores de neblina en las diversas orientaciones en que pueden ser instalados en los separadores líquido-vapor.

Fuente: Amisco Separation Products, Inc.

APÉNDICE C



Fuente: GPSA (1998).

Figura 26. Gráfica para estimar el coeficiente de arrastre.

APÉNDICE *D*

Tabla 30. Valores del factor de carga del sistema, utilizados para el dimensionamiento de separadores líquido-vapor, según el tipo de eliminador de neblina y las condiciones del servicio para las cuales se diseña.

| Eliminador de neblina tipo malla de densidad 9 – 12 lb/ft³ | | |
|---|---|---------------------------|
| Condiciones del Servicio | Tipo General de Eliminador de neblina | K |
| Fluidos Limpios, Con cargas moderadas de líquido, se ajusta al 90% de las situaciones. | Malla Estándar Mallas de Alta Eficiencia Mallas de Muy Alta Eficiencia | 0.35-0.36 0.35 0.25 |
| Altas viscosidades, Sólidos suspendidos | Mallas de Baja densidad, con altas capacidades de flujo y/o de trenzado tipo “Herringbone” | 0.40 |
| Operaciones al vacío 2 in Hg (abs) 16 in Hg (abs) Químicos Corrosivos | Mallas Estándar Mallas de Alta Eficiencia Alambres cubiertos con Plásticos o hebras plásticas | 0.20 0.27 0.21 |
| Eliminador de neblina tipo malla de 5 lb/ft³ de densidad | | |
| Eliminador de neblina tipo malla plástica (teflón o polipropileno) | | |
| La parte inferior del eliminador de neblina debe estar como mínimo a 12 pulgadas de alto de la superficie del líquido | | |

Fuente: Elaboración propia basada en los valores expuestos por Ludwig (2001) y Arnold (1999).

APÉNDICE *E*

Tabla 31. Tiempos de retención de las partículas líquidas, en función de la distancia a recorrer entre dos niveles de líquido, para separadores de orientación horizontal y vertical.

| Orientación del recipiente | Niveles del líquido | Tiempo mínimo de retención de las partículas líquidas entre los niveles (min) |
|-----------------------------------|----------------------------|--|
| Horizontal | LLLL – LLL | 1 – 2 |
| | LLL – HLL | 3 – 5 |
| | HLL – HHLL | 1 – 2 |
| Vertical | LLLL – LLL | 1 |
| | LLL – HLL | 3 – 4 |
| | HLL – HHLL | 1 |

Fuente: Elaboración propia a partir de la información en las bases y criterios de diseño del proyecto AGFP.

APÉNDICE *F*

Tabla 32. Descripción de las actividades a realizar en cada etapa de diseño, asociadas a un proyecto de ingeniería realizado en una empresa consultora.

| Etapas de diseño | Actividades realizadas |
|------------------------------|--|
| Ingeniería conceptual | <p>Se definen los procesos de manufactura y se realizan los balances de masa y energía.</p> <p>Se definen las condiciones de operación y se calculan las propiedades físicas y de transporte.</p> <p>Se especifican las materias primas y productos y los servicios industriales requeridos.</p> <p>Se seleccionan los materiales de construcción.</p> <p>Se realiza un estimado inicial del capital a invertir y la implantación preliminar.</p> <p>Se profundiza y se optimiza el diseño de los procesos.</p> <p>Se afinan los balances de masa y energía.</p> <p>Se asignan a todas las corrientes del proceso condiciones de operación, propiedades y flujos.</p> <p>Se define el diseño de los equipos mayores.</p> |
| Ingeniería básica | <p>Se dimensionan las líneas principales que los interconectan.</p> <p>Se preparan los Diagramas de Flujo de Proceso (PFDs).</p> <p>Se preparan las hojas de especificaciones de los equipos principales.</p> <p>Se inicia el diseño de los Diagramas de Tuberías e Instrumentación (DTIs o P&IDs).</p> <p>Se generan la lista de líneas y lista de puntos de interconexión (o Tie-ins).</p> <p>Se evalúa de nuevo un estimado o presupuesto de inversión y costos más preciso.</p> <p>Se analiza la viabilidad económica con lo cual se decidirá si se procede o no a la ingeniería de detalles.</p> <p>Es la etapa de diseño que precede a la construcción de la facilidad.</p> <p>Se complementan los planos y documentos preparados en la ingeniería básica.</p> <p>Se actualizan los datos y detalles de los fabricantes de los equipos en las hojas de datos correspondientes y los planos afectados.</p> <p>Se define el Layout final de los equipos en la planta, los dispositivos de control y seguridad, las edificaciones, iluminación y manejo de efluentes y desechos.</p> <p>Se finaliza la definición de la información requerida para la compra de instrumentos y controles.</p> |
| Ingeniería de detalle | <p>Se finaliza la definición de la información requerida para la compra de instrumentos y controles.</p> |

Fuente: Elaboración propia a partir de la información expuesta por Baumeister (s.f).

APÉNDICE G

DIAGRAMAS DE FLUJO DE PROCESOS

APÉNDICE G.1

Diagramas de flujo de procesos de la Planta de Refrigeración Mecánica con Propano para el Gas del Nivel de 60 psig y la Planta de Enfriamiento por Aire para el Gas del Nivel de 450 psig de la Estación de Flujo Carito

APÉNDICE G.2

Diagramas de flujo de procesos de la Planta de Refrigeración Mecánica con Propano para el Gas del Nivel de 60 psig y la Planta de Enfriamiento por Aire para el Gas del Nivel de 450 psig de la Estación de Flujo Musipán

APÉNDICE G.3

Diagramas de flujo de procesos de la Planta de Refrigeración Mecánica con Propano para el Gas del Nivel de 60 psig y la Planta de Enfriamiento por Aire para el Gas del Nivel de 450 psig de la Estación de Flujo Santa Bárbara

APÉNDICE *H*

**HOJAS DE DATOS DE LOS SEPARADORES
LÍQUIDO-VAPOR**

APÉNDICE H.1

**Hojas de datos del separador líquido-vapor V-601 diseñado para la
Planta de Refrigeración Mecánica con Propano
para el Gas del Nivel de 60 psig de la
Estación de Flujo Carito**

APÉNDICE H.2

**Hojas de datos del separador líquido-vapor V-301 diseñado para la
Planta de Enfriamiento por Aire para el
Gas del Nivel de 450 psig de la
Estación de Flujo Carito**

APÉNDICE H.3

**Hojas de datos del separador líquido-vapor V-701 diseñado para la
Planta de Refrigeración Mecánica con Propano
para el Gas del Nivel de 60 psig de la
Estación de Flujo Musipán**

APÉNDICE H.4

**Hojas de datos del separador líquido-vapor V-401 diseñado para la
Planta de Enfriamiento por Aire para el
Gas del Nivel de 450 psig de la
Estación de Flujo Musipán**

APÉNDICE H.5

**Hojas de datos del separador líquido-vapor V-801 diseñado para la
Planta de Refrigeración Mecánica con Propano
para el Gas del Nivel de 60 psig de la
Estación de Flujo Santa Bárbara**

APÉNDICE H.6

**Hojas de datos del separador líquido-vapor V-501 diseñado para la
Planta de Enfriamiento por Aire para el
Gas del Nivel de 450 psig de la
Estación de Flujo Santa Bárbara**

APÉNDICE I

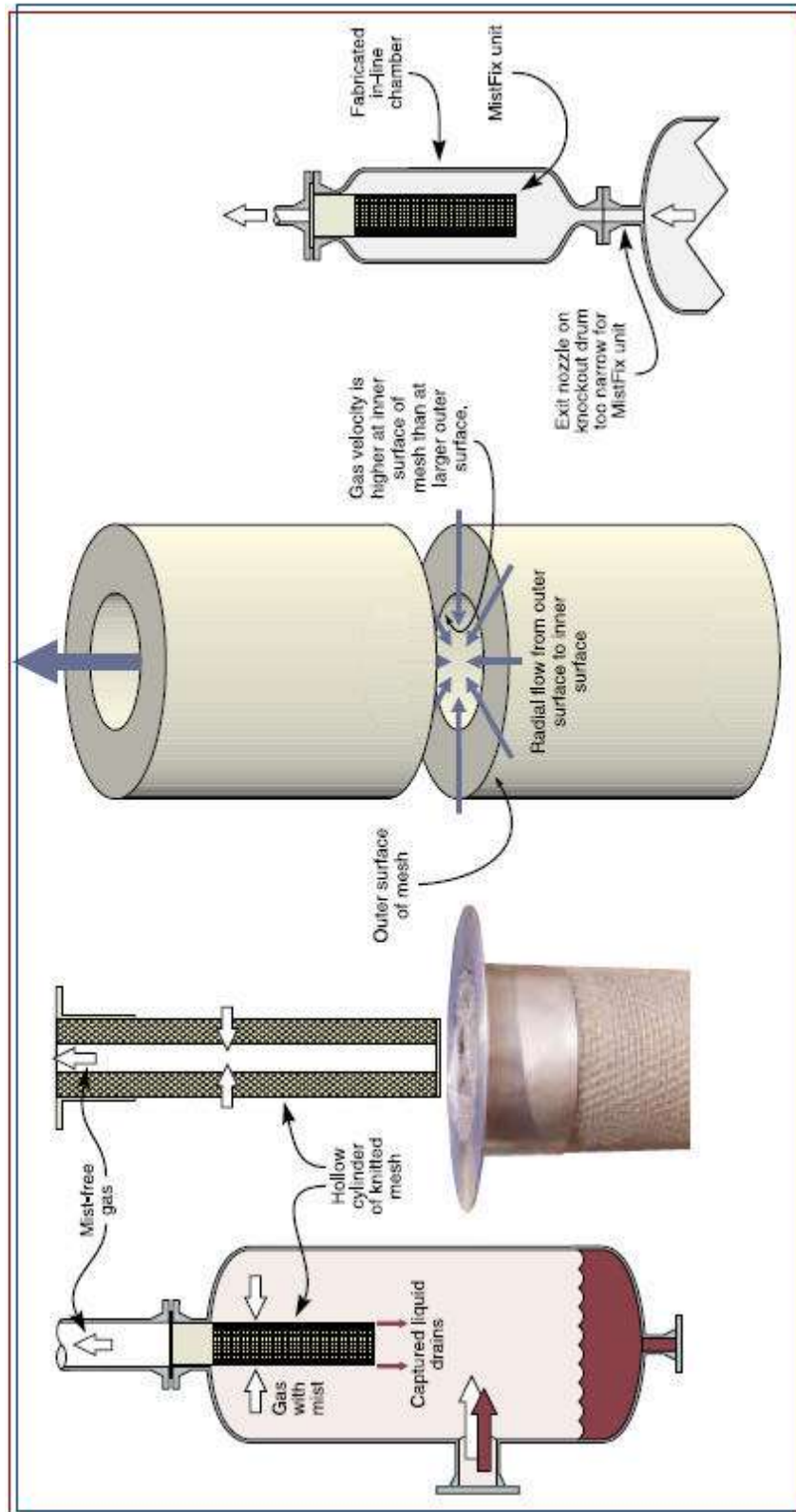


Figura 27. Instalación de un eliminador de neblina tipo MistFix™ adentro y afuera de un recipiente.

Fuente: Amistco Separation Products, Inc.



UNIVERSIDAD
METROPOLITANA
Enseñando el camino



Estado del Arte de las tecnologías utilizadas para minimizar el arrastre de líquidos en separadores líquido-vapor en un proceso de acondicionamiento de gas

María Clara Omaña Pérez

Tutor Académico: Ing. Ana Damián

Tutor Industrial: María Rosa Torres

C
O
N
T
E
N
I
D
O

- ◆ Estudios y Proyectos DITECH, S.A
- ◆ Planteamiento del problema
- ◆ Objetivo general
- ◆ Objetivos específicos
- ◆ Justificación
- ◆ Marco teórico
- ◆ Estado del Arte
- ◆ Marco metodológico
- ◆ Análisis y resultados
- ◆ Conclusiones
- ◆ Recomendaciones

Estudios y Proyectos DITECH, S.A

“Es una empresa consultora dedicada a la ingeniería, procura y construcción de proyectos integrales, orientados hacia los sectores Petrolero, Petroquímico, Gas, Industrias Básicas, Naval, Portuario, Industrial, Químico, Transporte e Infraestructura... abarcando todas las fases de desarrollo de los proyectos”



Fuente: <http://www.ditharris.com.ve/>

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La situación

Fallas en Plantas Compresoras

La causa

Presencia de líquidos en el gas

Las consecuencias

- ◇ Afectan la operación y capacidad de transferencia del gas natural del distrito Monagas
- ◇ Generan la quema de gas rico

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA (Cont.)

DITECH, S.A

Requiere la elaboración del Estado del Arte, sobre las tecnologías, mejoras y tendencias actuales que se implementan en el mundo, en aras de minimizar el **arrastre de líquido en los separadores líquido-vapor**.

Estudio de la incidencia en el arrastre de:

- ◇ Las variables de diseño
- ◇ Las condiciones de operación
- ◇ La instrumentación
- ◇ Los dispositivos internos
- ◇ Las propiedades físicas de la mezcla



OBJETIVO GENERAL

Efectuar una investigación completa del Estado del Arte, sobre las tecnologías, tendencias y mejoras que se aplican satisfactoriamente en el mundo, para minimizar el arrastre de líquido en la corriente de vapor de salida de separadores líquido-vapor, con el fin de evaluar los separadores diseñados para el proyecto Acondicionamiento de Gas en Fuentes de Producción.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ◆ Explorar las tecnologías, mejoras y tendencias actuales, que se llevan a cabo en el mundo, para evitar el arrastre de líquidos, en el vapor de salida, de los separadores líquido-vapor con el fin de realizar el Estado del Arte.
- ◆ Identificar las variables de diseño y las propiedades físicas de los fluidos, que intervienen en el arrastre de líquidos, en el vapor de salida, de los separadores líquido-vapor.
- ◆ Evaluar los dispositivos internos de los separadores, como variables que actúan sobre el arrastre de líquidos, en el vapor de salida, de los separadores líquido-vapor.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS (Cont.)

- ❖ Evaluar las condiciones de operación de los separadores líquido-vapor diseñados en el proyecto Acondicionamiento de Gas en Fuentes de Producción con el fin de conocer su posible incidencia en el arrastre de líquidos.
- ❖ Evaluar la incidencia de la instrumentación de los equipos diseñados, en el arrastre de líquidos, en el vapor de salida, de los separadores líquido-vapor.
- ❖ Comparar el Estado del Arte con la tecnología diseñada para el proyecto Acondicionamiento de Gas en Fuentes de Producción, con el fin de realizar recomendaciones actualizadas, de los separadores líquido-vapor.

Necesidad de actualizar la información

Situación



- ◇ Conocida
- ◇ Abandonada
- ◇ Críticamente importante

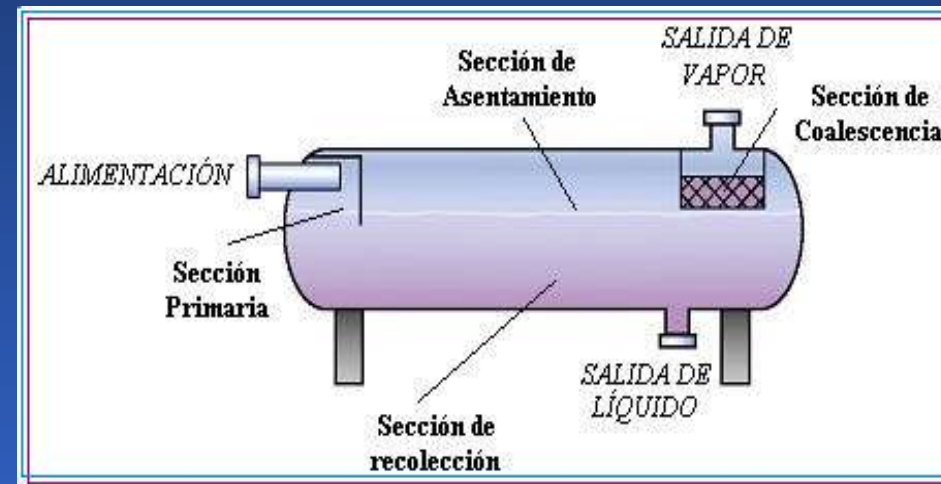
Aportes

- ◇ Estudio del arrastre de líquidos en separadores para el Departamento de Procesos de DITECH, S.A
- ◇ Actualización de las tecnologías para mejorar la separación líquido-vapor
- ◇ Mejoras en el procedimiento de diseño de separadores líquido-vapor del Departamento de Procesos de DITECH, S.A

MARCO TEÓRICO

Conceptos

- ◆ Separador
- ◆ Principios de separación
 - ▣ *Momentum*
 - ▣ Asentamiento por gravedad
 - ▣ Coalescencia
- ◆ Partes de un separador
 - ▣ Sección primaria
 - ▣ Sección secundaria o de asentamiento
 - ▣ Sección de recolección de líquido o sumidero
 - ▣ Sección de coalescencia



Conceptos (Cont.)

◆ Clasificación de los separadores

▣ Según su función

- Bifásicos
 - ▲ Líquido-vapor
 - ▲ Líquido-líquido
- Trifásicos
- Tetrafásicos

▣ Según su forma

- Esféricos
- Cilíndricos
 - ▲ Verticales
 - ▲ Horizontales
- De dos barriles
- Centrífugos

◆ Dispositivos internos de los separadores

▣ Internos de Entrada

- Cambio de momentum en la alimentación
- Distribución uniforme de las fases
- Disipar la energía cinética del fluido
- ▲ Placas deflectoras
- ▲ Distribuidores de flujo
- ▲ Ciclones de entrada

Conceptos (Cont.)

▣ Eliminadores de Neblina

- ▲ Malla
- ▲ Vanes
- ▲ Centrífugos
- ▲ Lechos de fibra

▣ Rompe vórtices

- ▲ Rejillas
- ▲ Placas

▣ Rompe espuma

- ▲ Placas (correctivo)
- ▲ Adición de químicos (preventivo)
- ▲ Otras soluciones

▣ Placas rompe olas

◇ Problemas operacionales

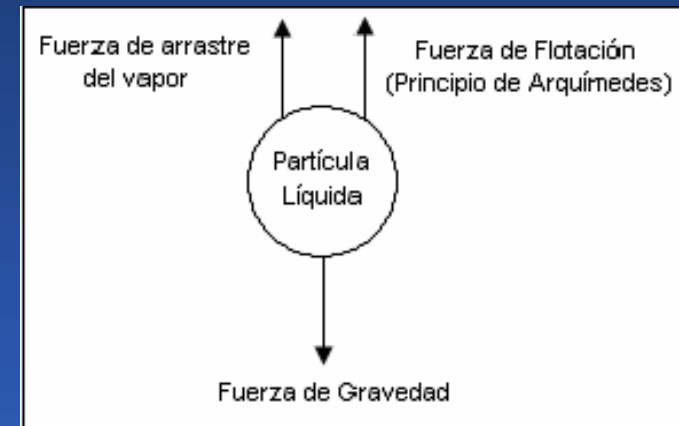
- ▣ Arrastre de líquido
- ▣ Formación de espuma
- ▣ Taponamiento del eliminador de neblina
- ▣ Flujo de avance (oleaje)

Bases teóricas

Teoría de asentamiento

Suposiciones:

- ◆ Esferas sólidas y rígidas
- ◆ Una sola gota
- ◆ Actúan tres fuerzas sobre la gota
- ◆ Separador vertical



Fuente: Zabala (2005).

▣ Fuerza de arrastre

$$F_D = \frac{\rho_V \cdot v_t^2 \cdot C_D \cdot A_P}{2}$$

▣ Fuerza de flotación

$$F_B = \rho_V \cdot g \cdot V_P$$

▣ Fuerza de gravedad

$$F_G = \rho_L \cdot g \cdot V_P$$

Bases teóricas (Cont.)

Tabla 1. Valores del Número de Reynolds, el diámetro de partícula y el coeficiente de arrastre para cada ley aplicable, según el régimen de flujo de la mezcla en el separador.

| Ley que aplica según el régimen de flujo | Número de Reynolds (adim) | Diámetro de partícula (mm) | Coficiente de arrastre (adim) |
|--|---------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Ley de Newton | 200.000 - 500 | 100.000 - 1.500 | 0,44 |
| Ley Intermedia | 500 - 2 | 1.500 - 100 | $18,5 \cdot Re^{-0,6}$ |
| Ley de Stokes | 2 - 0,1 | 100 - 3 | $24 \cdot Re^{-1}$ |
| Ley de Stokes - Cunningham | 0,1 - 0,0001 | 3 - 0,1 | $24 \cdot Re^{-1}$ |
| Movimiento Browniano | < 0,0001 | < 0,1 | $24 \cdot Re^{-1}$ |

Bases teóricas (Cont.)

◆ Variables operacionales incidentes en el arrastre de líquidos

▣ Velocidad del vapor

⊙ Velocidad terminal

$$v_t = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot D_P \cdot (\rho_L - \rho_V)}{3 \cdot C_D \cdot \rho_V}}$$

Velocidad con que cae la gota a través del vapor

⊙ Velocidad crítica

$$v_c = K \sqrt{\frac{(\rho_L - \rho_V)}{\rho_V}}$$

Velocidad máxima permisible del vapor

⊙ Velocidad del vapor

$$v_v = \frac{Q_v}{A_T}$$

Velocidad del vapor en el recipiente

Bases teóricas (Cont.)

- ◆ Variables operacionales incidentes en el arrastre de líquidos (Cont.)
 - ◆ Diámetro de partícula

Tabla 2. Tamaño de la partícula a fijar para el dimensionamiento de un separador sin eliminador de neblina según el servicio que se requiere

| Servicio | Diámetro de partícula (mm) |
|--|----------------------------|
| <i>Flare KOD</i> | 500 |
| Separador vertical y horizontal | 350 |
| Separador de reflujo | 225 |
| Separador a la entrada de una torre con riesgo de espuma | 50 |
| Separador en la succión de un compresor | 50 |
| Separador de gas combustible | 50 |

Bases teóricas (Cont.)

◆ Variables operacionales incidentes en el arrastre de líquidos (Cont.)

▣ Coeficiente de arrastre

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0,4$$



Función del Número de Reynolds

$$Re = \frac{D_P \cdot v_t \cdot \rho_V}{\mu_V}$$

▣ Factor de carga del sistema "K"

Calculado empíricamente

$$v_c = K \sqrt{\frac{(\rho_L - \rho_V)}{\rho_V}}$$

Es función de:

- El tamaño de la partícula
- La carga de líquido
- El tipo de interno
- La presión de operación
- La presencia de sólidos
- La viscosidad del líquido
- La viscosidad del vapor
- La geometría del equipo
- El coeficiente de arrastre
- La altura por encima del eliminador
- La tensión superficial

Bases teóricas (Cont.)

- ◆ Variables operacionales incidentes en el arrastre de líquidos (Cont.)
 - ▣ Factor de carga del sistema (Cont.)

Correcciones

- ▲ Orientación del separador
- ▲ Tipo de eliminador de neblina
- ▲ Presión de operación
- ▲ Tipo de mezcla que se maneja

Corrección del factor "K" según la orientación del separador

$$K_H = F \cdot K_V$$

$$F = \frac{L_E}{H_V}$$

Tabla 3. Valores típicos del factor de carga utilizados para el dimensionamiento de separadores líquido-vapor con eliminador de neblina tipo malla, según la configuración del separador

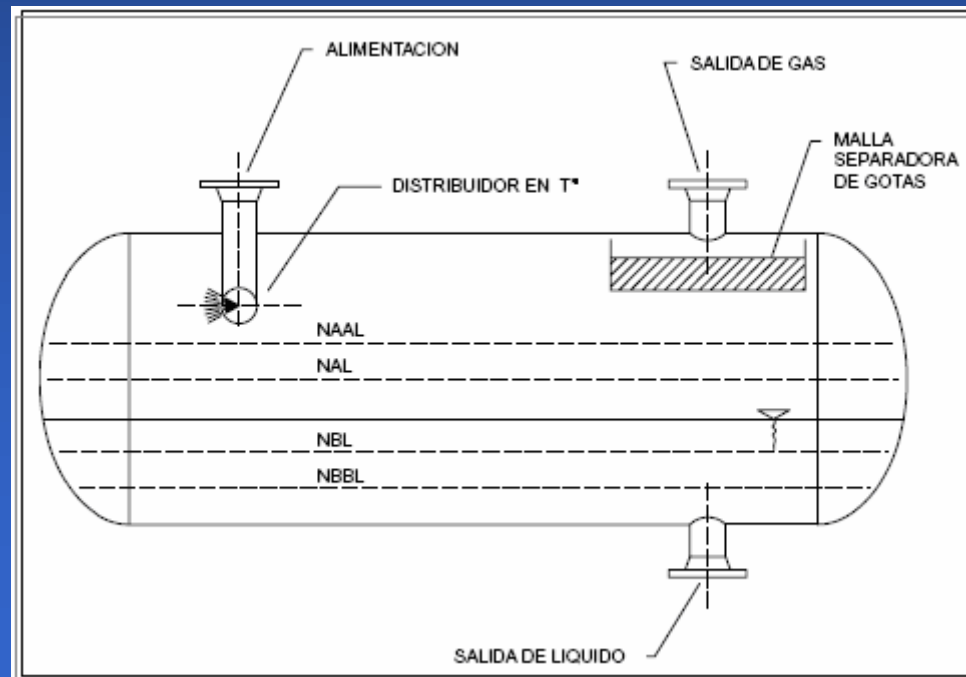
| Separador | Factor K (ft/s) |
|------------|-----------------|
| Horizontal | 0,40 – 0,50 |
| Vertical | 0,18 – 0,35 |
| Esférico | 0,20 – 0,35 |

Bases teóricas (Cont.)

- ◆ Variables operacionales incidentes en el arrastre de líquidos (Cont.)
 - ▣ Relación líquido-vapor

Selección del tipo de separador a diseñar

- ▣ Nivel del líquido



Bases teóricas (Cont.)

- ◆ Variables operacionales incidentes en el arrastre de líquidos (Cont.)
 - ▣ Tiempo de residencia

$$t_R = \frac{V}{Q_L}$$

Tabla 4. Tiempo mínimo de residencia del líquido en los niveles de un separador líquido-vapor

Establecido según



- Servicio
- Control
- Equipos aguas abajo
- Gravedad API

| Orientación del recipiente | Niveles del líquido | Tiempo mínimo de retención de las partículas líquidas entre los niveles (min) |
|----------------------------|---------------------|---|
| Vertical | NBBL – NBL | 1 |
| | NBL – NAL | 3 – 4 |
| | NAL – NAAL | 1 |

Bases teóricas (Cont.)

◆ Variables operacionales incidentes en el arrastre de líquidos (Cont.)

▣ Tendencia a formar espuma



Afecta el desempeño del separador



Perturba el sistema de control de la unidad



La espuma se mantiene en un nivel más alto

Bases teóricas (Cont.)

◆ Propiedades físicas incidentes en el arrastre de líquidos (Cont.)

▣ Densidad del líquido



Mientras el líquido sea más denso
más rápida será la razón de asentamiento de las gotas



▣ Densidad del vapor



Mientras el vapor sea menos denso
más rápida será la razón a la cual las gotas se asientan



Mientras mayor sea la diferencia de densidades entre las fases
más fácil será la separación

Bases teóricas (Cont.)

◆ Propiedades físicas incidentes en el arrastre de líquidos (Cont.)

▣ Viscosidad del líquido



Mientras el líquido sea menos viscoso
menor será el arrastre de líquidos en el separador



Valores elevados promueven la inundación del interno

▣ Viscosidad del vapor



Mientras el vapor sea menos viscoso
menor será el arrastre de líquidos en el separador



Valores elevados impiden la separación de las gotas

Bases teóricas (Cont.)

◆ Propiedades físicas incidentes en el arrastre de líquidos (Cont.)

▣ Tensión superficial



Mientras menor sea la tensión superficial

El drenaje se verá menos impedido en el eliminador



Altas tensiones superficiales promueven la inundación del eliminador de neblina y la formación de espumas

◆ Incidencia de las condiciones de operación en el arrastre

▣ Presión

○ Promotor de la deposición de asfaltenos y parafinas

○ Corrección del factor de carga "K"

○ Separadores críticos \Rightarrow > 435 psig \Rightarrow Uso de programas de simulación dinámica

Bases teóricas (Cont.)

- ◆ Incidencia de las condiciones de operación en el arrastre (Cont.)
 - ▣ **Temperatura**
 - Promotor de la deposición de asfaltenos y parafinas
 - Ocasiona cambios en las propiedades físicas de la mezcla
 - ▣ **Flujos**
 - Afectan la capacidad de los internos (inundación)
 - Creación de *slugs*
- ◆ Incidencia de la instrumentación
 - ▣ **Control de nivel**
 - ▣ **Localización de la instrumentación**
 - Lecturas erróneas

ESTADO DEL ARTE

Eliminadores de neblina tipo malla

MistFix™

Amistco Separation Products, Inc.
(Patente US 5.985.004)



Fuente: <http://www.amistco.com>

VKR Enhanced™

BECO Engineering
(Patente US 5.439.510)



Fuente: http://hub12.data-centre.info/knitmesh/data/vkr_mist_eliminator.pdf

ESTADO DEL ARTE (Cont.)

Eliminadores de neblina tipo malla (Cont.)

Mist-Master™

Enhanced Separations
Technologies, Ltd



Fuente: <http://www.becoengineering.com/mistelimination.html>

Demister®

Koch-Glitsch, LP



Fuente: <http://www.koch-ottoyork.com/products/DEMISTER.htm>

ESTADO DEL ARTE (Cont.)

Eliminadores de neblina tipo *vane*

Eliminador de neblina tipo *vane* de configuración radial
(construida para los separadores VRF)

NATCO Group



ESTADO DEL ARTE (Cont.)

Eliminadores de neblina tipo *vane* (Cont.)

FLEXICHEVRON®

Koch-Glitsch, LP



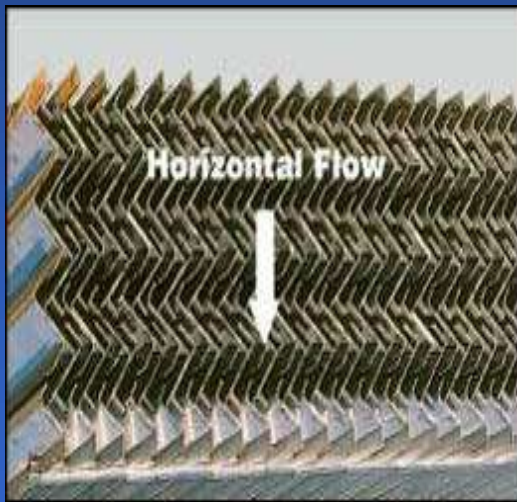
ESTADO DEL ARTE (Cont.)

Eliminadores de neblina tipo *vane* (Cont.)

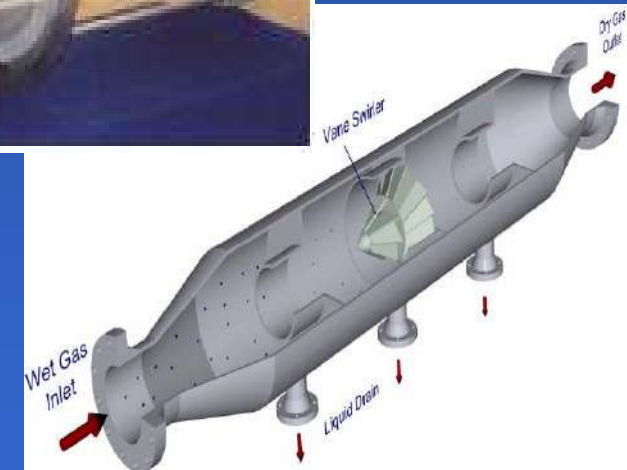
Double pocket vanes

AZGAZ®

Amistco Separation Products, Inc.



Merpro Ltd



Fuente: http://www.amistco.com/PRODUCTS/ELIMINATORS/msh_vne.html

Fuente: <http://www.merpro.com/PRNFrontend/upload/MTD08%20Azgaz.pdf>

ESTADO DEL ARTE (Cont.)

Eliminadores de neblina tipo ciclónico

*Compact Cyclone Inlet Device
(G-Sep™ CCI)*

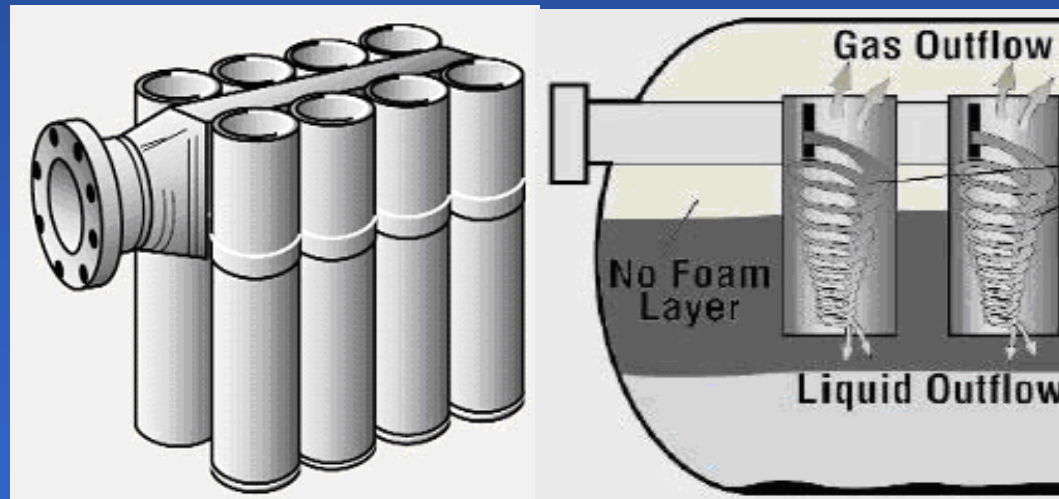
Aker Kværner ASA



Fuente: <http://www.akerkvaerner.com>

Porta-Test Revolution™

NATCO Group



Fuente: <http://www.natcogroup.com/Content.asp?t=ProductPage&ProductID=30>

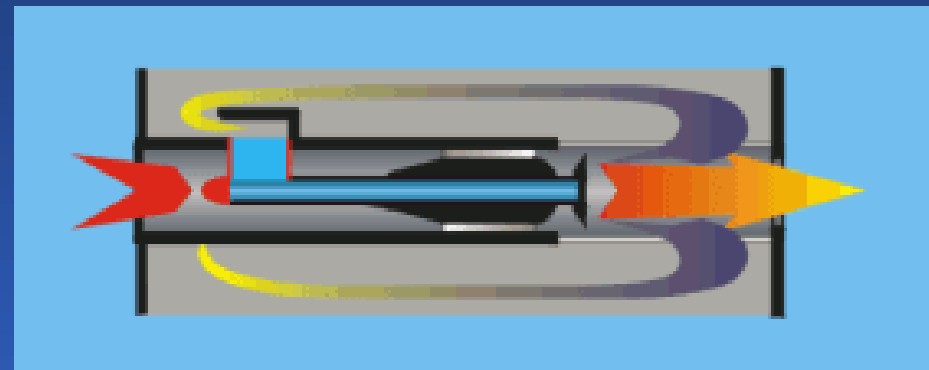
ESTADO DEL ARTE (Cont.)

Eliminadores de neblina tipo ciclónico (Cont.)

SpiraFlow™

CDS Engineering

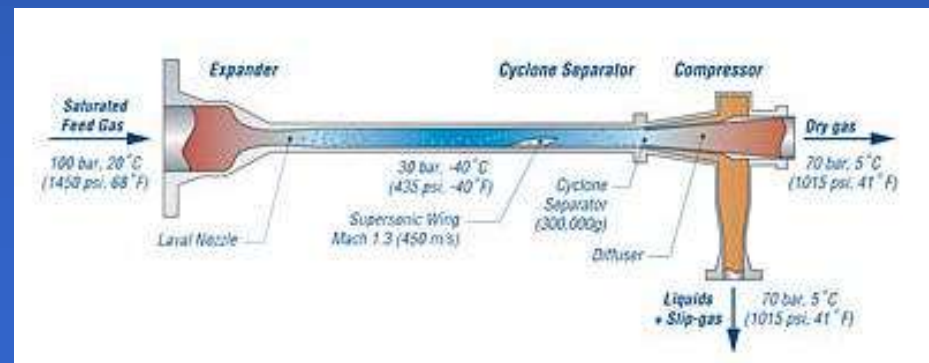
Fuente: <http://www.cdsengineering.nl/>



Twister™ Supersonic Separator

Twister BV

Fuente: <http://www.twisterbv.com/>

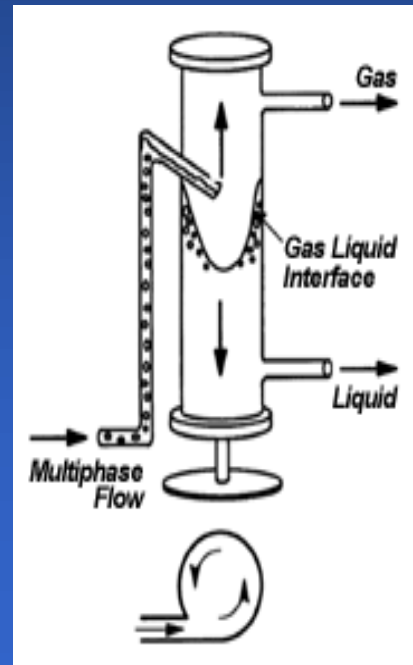


ESTADO DEL ARTE (Cont.)

Eliminadores de neblina tipo ciclónico (Cont.)

GLCC – Gas-Liquid Cylindrical Cyclone®

Universidad de Tulsa

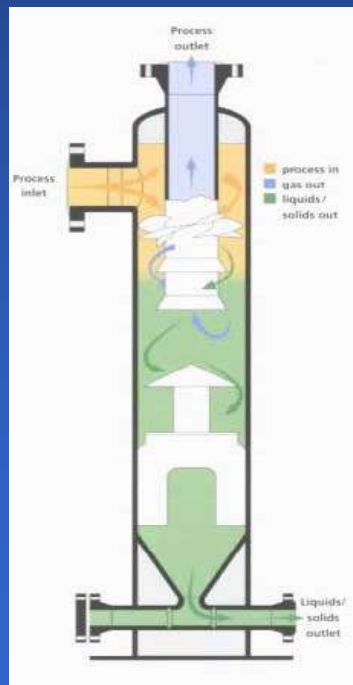


ESTADO DEL ARTE (Cont.)

Eliminadores de neblina tipo ciclónico (Cont.)

Separador Gasunie™

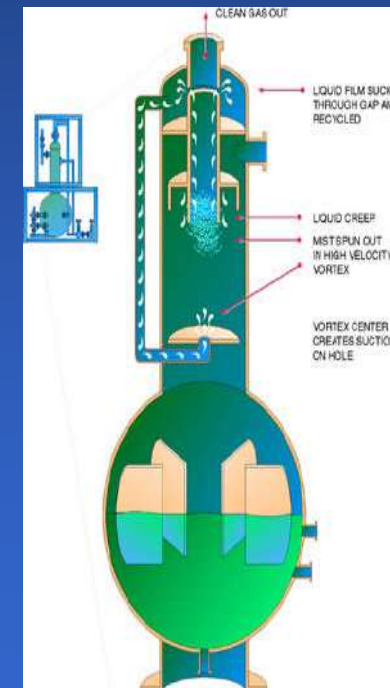
CDS Engineering



Fuente: http://www.cdsengineering.com/product_cyclone.html

Separador Expro Mega Flow

EXPRO Group



Fuente: <http://www.exprogroup.com/corpus/separators/separators.asp>

ESTADO DEL ARTE (Cont.)

Otras tecnologías

Combinación de mallas y vanes

Amistco Separation Products, Inc.

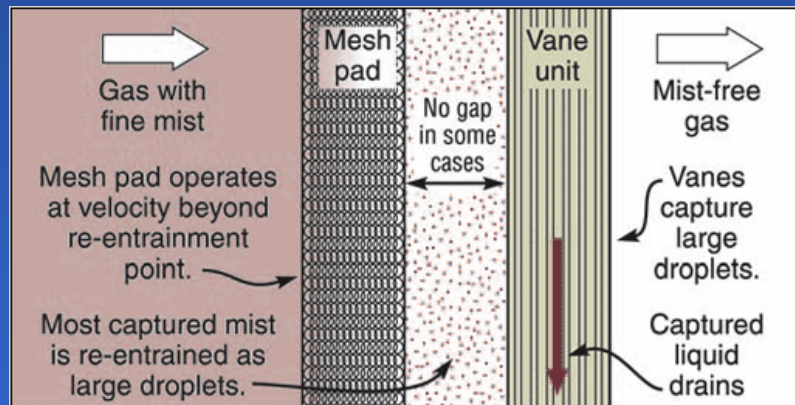


Figure 20: Boosting throughput and efficiency of a mesh pad by following it with a vane unit

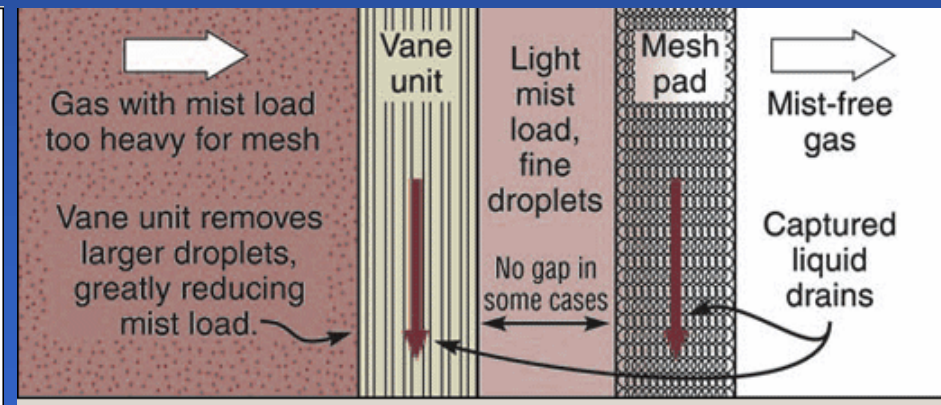


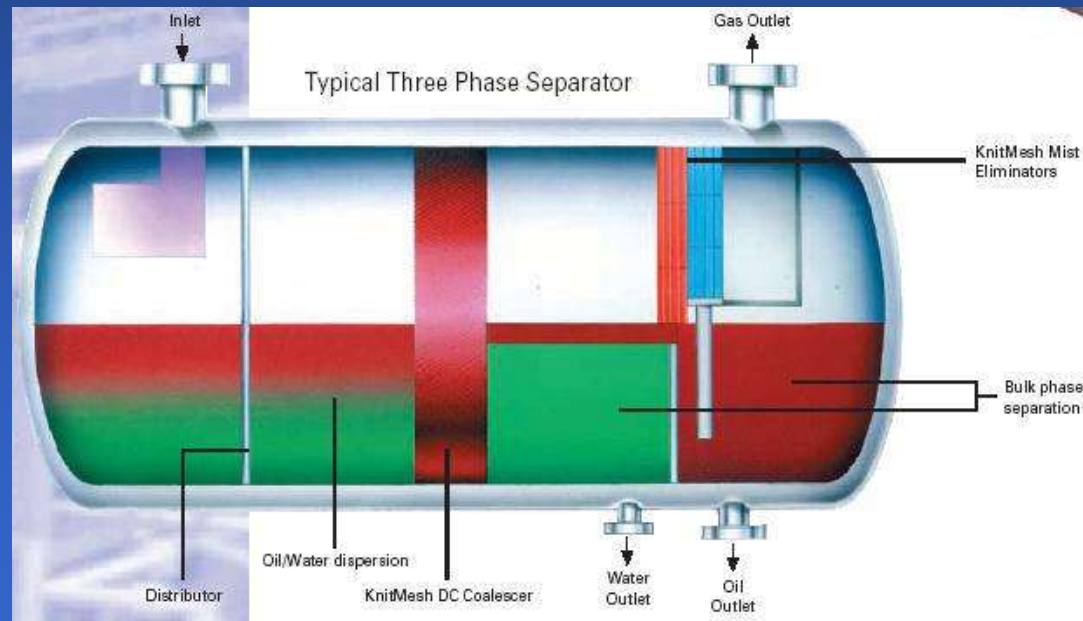
Figure 21: Shielding a mesh pad from a very heavy mist load with a vane unit ahead

ESTADO DEL ARTE (Cont.)

Otras tecnologías (Cont.)

DC Coalescer

Knitmesh



ESTADO DEL ARTE (Cont.)

Otras tecnologías (Cont.)

York-Evenflow™

Koch-Glitsch, LP



Fuente: <http://www.koch-ottoyork.com/products/EVENFLOW.htm>

E-Pack

BECO Engineering



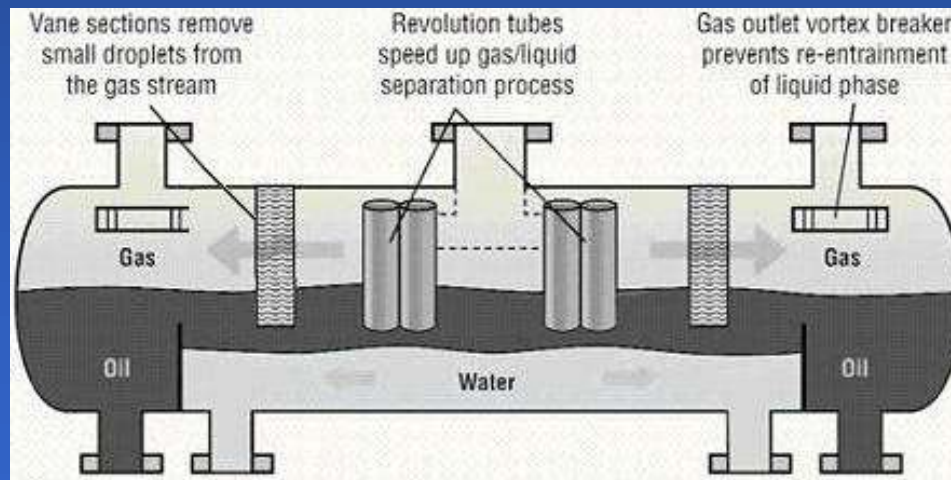
Fuente: <http://www.koch-ottoyork.com/products/EVENFLOW.htm>

ESTADO DEL ARTE (Cont.)

Otras tecnologías (Cont.)

*Horizontal Dual Flow Separators Lower
Flowing Velocities to Reduce Size*

NATCO Group



Fuente: <http://hub12.data-centre.info/knitmesh/data/coalescers2.pdf>

Schoepentoeter™

Patentado por Shell
Fabricado por Sulzer Chemtech



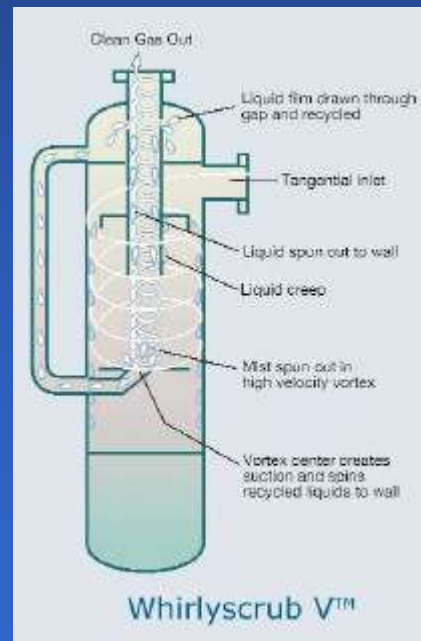
Fuente: <http://www.sulzerchemtech.com>

ESTADO DEL ARTE (Cont.)

Otras tecnologías (Cont.)

Compact Porta-Test Whirlyscrub V™

NATCO Group



Flexifiber®

Koch-Glitsch, LP

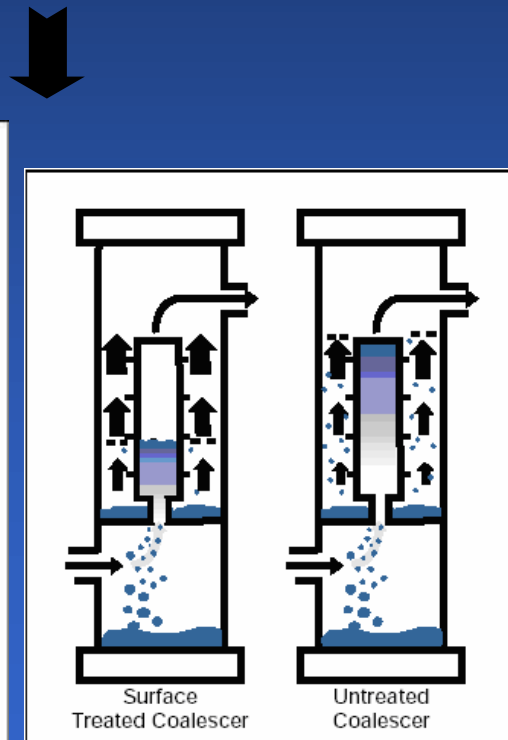


Fuente: <http://www.koch-ottoyork.com/products/FLEXIFIBER.htm>

Fuente: <http://www.natcogroup.com/Content.asp?t=ProductPage&ProductID=32>

ESTADO DEL ARTE (Cont.)

Internos de superficie tratada (Pall Corporation)



Fuente: Wines (2003).

Simulación
dinámica
computarizada

Computational Fluid
Dynamics (CFD)

MARCO METODOLÓGICO

Procedimiento para realizar el Estado del Arte

◆ Fase heurística

- ▣ Búsqueda
- ▣ Selección

◆ Fase hermenéutica

- ▣ Analizar
- ▣ Catalogar
- ▣ Seleccionar

Procedimiento para evaluar los separadores (AGFP)

- ◆ Configuración geométrica del separador líquido-vapor
- ◆ Verificación del tiempo de residencia del líquido

- ▣ Calculó el área transversal del recipiente

$$A_T = \frac{\pi(D)^2}{4}$$

MARCO METODOLÓGICO (Cont.)

◇ Verificación del tiempo de residencia del líquido

- ▣ Cálculo del tiempo de residencia

$$t_{Rn} = \frac{H_n \cdot A_T}{Q_L}$$

◇ Verificación del arrastre de líquido

- ▣ Cálculo de la velocidad crítica

Factor "K" corregido por presión

$$v_C = K \sqrt{\frac{(\rho_L - \rho_V)}{\rho_V}}$$

- ▣ Cálculo de la velocidad del vapor

$$v_V = \frac{Q_V}{A_T}$$

CRITERIO $V_V < V_C$

ANÁLISIS Y RESULTADOS

Configuración geométrica del separador líquido-vapor

Tabla 5. Flujos máxicos de los separadores en las distintas estaciones

| Estación de Flujo | Planta | Separador | Q_L (lb/h) | Q_V (lb/h) | Relación vapor-líquido |
|-------------------|------------------------------------|-----------|--------------|--------------|------------------------|
| Carito | Refrigeración Mecánica con Propano | V-601 | 1006 | 70750 | 70,3 |
| | Enfriamiento por Aire | V-301 | 1453 | 185600 | 128 |
| Musipán | Refrigeración Mecánica con Propano | V-701 | 900,4 | 99970 | 111 |
| | Enfriamiento por Aire | V-401 | 740,9 | 151200 | 204 |
| Santa Bárbara | Refrigeración Mecánica con Propano | V-801 | 416,1 | 22280 | 53,5 |
| | Enfriamiento por Aire | V-501 | 254,8 | 12250 | 48,1 |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de los separadores del proyecto AGFP.

Verificación del tiempo de residencia del líquido

Tabla 6. Tiempo de residencia en cada nivel del líquido

| Estación de Flujo | Planta | Separador | Tiempo de residencia en el nivel (min) | | | | |
|-------------------|------------------------------------|-----------|--|-----------|-----------|-----------|------------|
| | | | t_{HHLL} | t_{HLL} | t_{NLL} | t_{LLL} | t_{LLLL} |
| Carito | Refrigeración Mecánica con Propano | V-601 | 26 | 20 | 20 | 26 | 39 |
| | Enfriamiento por Aire | V-301 | 25 | 19 | 19 | 25 | 38 |
| Musipán | Refrigeración Mecánica con Propano | V-701 | 47 | 35 | 35 | 47 | 71 |
| | Enfriamiento por Aire | V-401 | 39 | 29 | 29 | 39 | 58 |
| Santa Bárbara | Refrigeración Mecánica con Propano | V-801 | 25 | 18 | 18 | 25 | 37 |
| | Enfriamiento por Aire | V-501 | 32 | 24 | 24 | 32 | 48 |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de los separadores del proyecto AGFP.

Verificación del arrastre de líquido

Tabla 7. Velocidad crítica y velocidad del vapor de los separadores

| Estación de Flujo | Planta | Separador | n_v (ft/s) | n_c (ft/s) |
|-------------------|------------------------------------|-----------|--------------|--------------|
| Carito | Refrigeración Mecánica con Propano | V-601 | 3,70 | 3,53 |
| | Enfriamiento por Aire | V-301 | 1,82 | 1,58 |
| Musipán | Refrigeración Mecánica con Propano | V-701 | 3,80 | 3,81 |
| | Enfriamiento por Aire | V-401 | 1,80 | 1,53 |
| Santa Bárbara | Refrigeración Mecánica con Propano | V-801 | 2,51 | 3,33 |
| | Enfriamiento por Aire | V-501 | 0,36 | 1,30 |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de los separadores del proyecto AGFP.

CONCLUSIONES

- ◊ Las variables operacionales que inciden en el *carryover* son:
 - ⊙ La relación líquido-vapor (selección del tipo, configuración y orientación)
 - ⊙ La velocidad del vapor (menor que la velocidad crítica para evitar arrastre)
 - ⊙ El diámetro de la gota (eficiencia y espacio)
 - ⊙ El factor de carga del sistema (define la velocidad permisible)
 - ⊙ El coeficiente de arrastre (depende del régimen de flujo)
 - ⊙ El nivel del líquido (crítico en recipientes horizontales, oleaje)
 - ⊙ Los tiempos de retención del líquido (separación de las fases)
 - ⊙ Los tiempos de retención del vapor (arrastre de líquido)
 - ⊙ La formación de espuma (arrastre)

CONCLUSIONES

- ◇ Las propiedades físicas de la mezcla que inciden en el *carryover* son:
 - ⊙ La densidad de las fases (a menor diferencia, más difícil la separación)
 - ⊙ La viscosidad del vapor (mientras más viscoso, más difícil la separación)
 - ⊙ La viscosidad del líquido (aumenta el tiempo de residencia del líquido en el eliminador promoviendo el taponamiento)
 - ⊙ La tensión superficial (promotor de la inundación del eliminador)

CONCLUSIONES

- ◆ Los dispositivos internos inciden en el *carryover* de la siguiente forma:
 - ◎ Internos de entrada (separación inicial y distribución uniforme de las fases)
 - ◎ Internos en el sumidero (evitan problemas operacionales en el fondo)
 - ◎ Internos de coalescencia (afinamiento final de la separación)

CONCLUSIONES

- ◆ Las condiciones de operación que inciden en el *carryover* son:
 - ⊙ La presión (promotor del taponamiento de las mallas)
 - ⊙ La temperatura (promotor del taponamiento de las mallas)
 - ⊙ Los flujos (afectan el desempeño de los internos y forman los *slugs*)
- ◆ Con respecto a la instrumentación, es de vital importancia el control de nivel (problemas operacionales, reducción del espacio libre y formación de espumas).
- ◆ En la elaboración del Estado del Arte se encontró el uso de la tecnología ciclónica, el tratamiento químico de las superficie de los internos y el uso de programas de simulación dinámica (CFD) en el diseño de separadores a condiciones críticas.
- ◆ Teóricamente se predice que existe arrastre de líquidos en los separadores evaluados en las Estaciones de Flujo Carito y Musipán.

RECOMENDACIONES

◆ Para el proyecto AGFP:

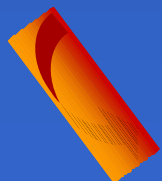
Para la disminución del arrastre de líquidos se puede aumentar la velocidad crítica permisible del vapor en el separador, esto se puede lograr:

1. Utilizar una combinación de *vane* y malla



Aumento de "K" permite mayores velocidades

Factor a tenerse en cuenta



Espacio geométrico que ocupará en el separador

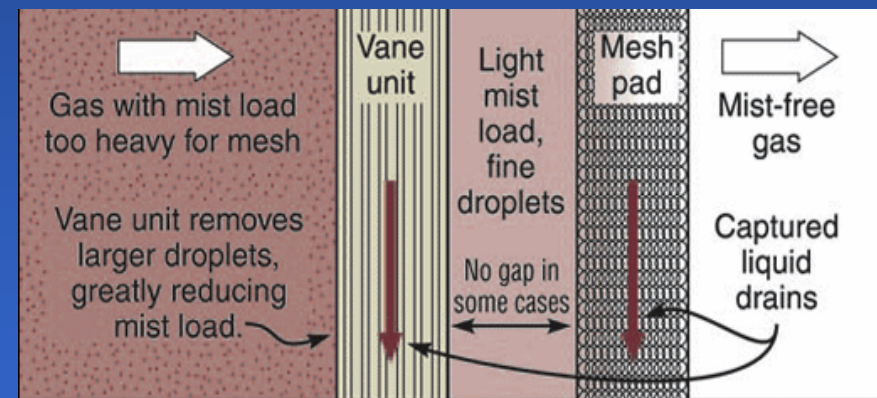
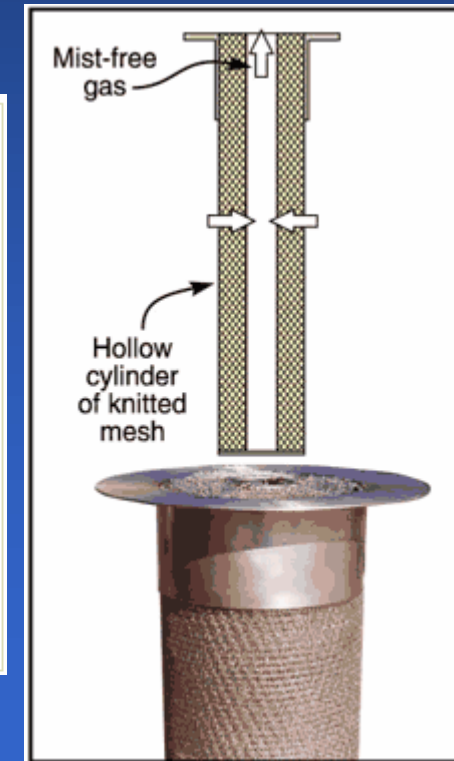
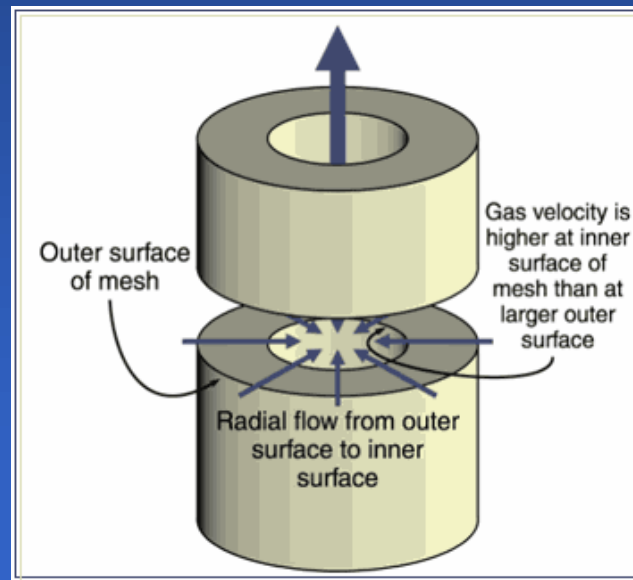
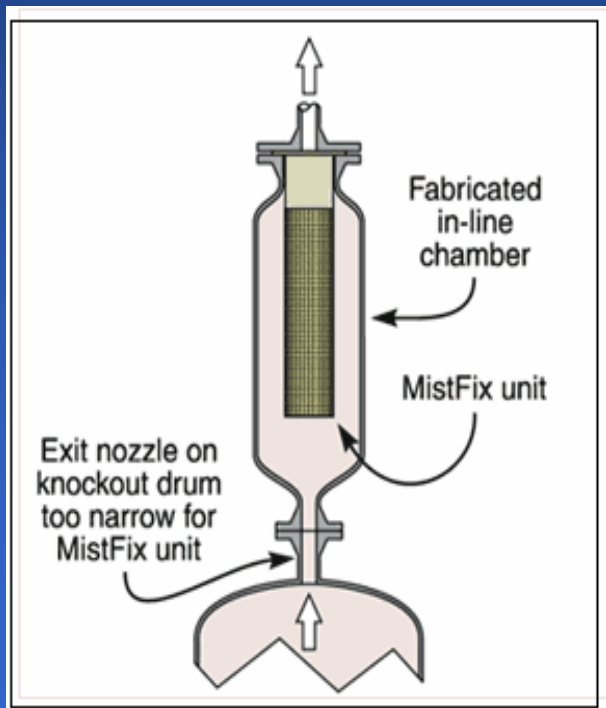


Figure 21: Shielding a mesh pad from a very heavy mist load with a vane unit ahead

Fuente: <http://www.amistco.com>

RECOMENDACIONES

2. Cambiar la malla por un *vane* y colocar un MistFix™ en la salida del vapor



RECOMENDACIONES

◇ Para Estudios y Proyectos DITECH, S.A:

- ⊙ Tomar en cuenta la información sobre la incidencia de las variables operacionales, las propiedades físicas, las condiciones de operación y la instrumentación en el diseño de separadores líquido-vapor.
- ⊙ Incluir la información recopilada en el Estado del Arte, en la sección de internos en el procedimiento de diseño del Departamento de Procesos.

◇ Generales:

- ⊙ Fomentar el estudio experimental del arrastre de líquidos en separadores líquido-vapor.
- ⊙ Impulsar el estudio del tratamiento químico de la superficie de los internos de coalescencia.

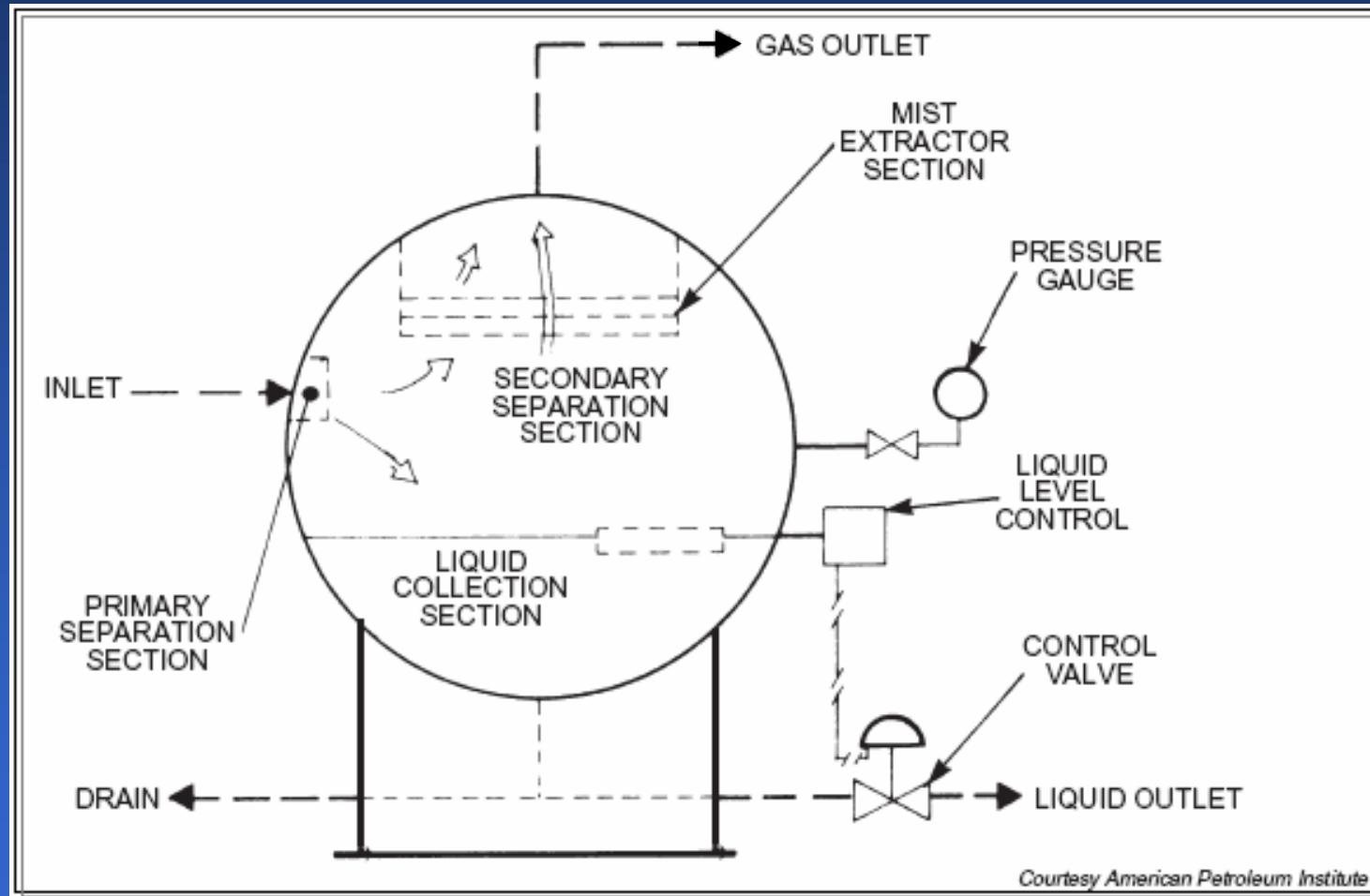


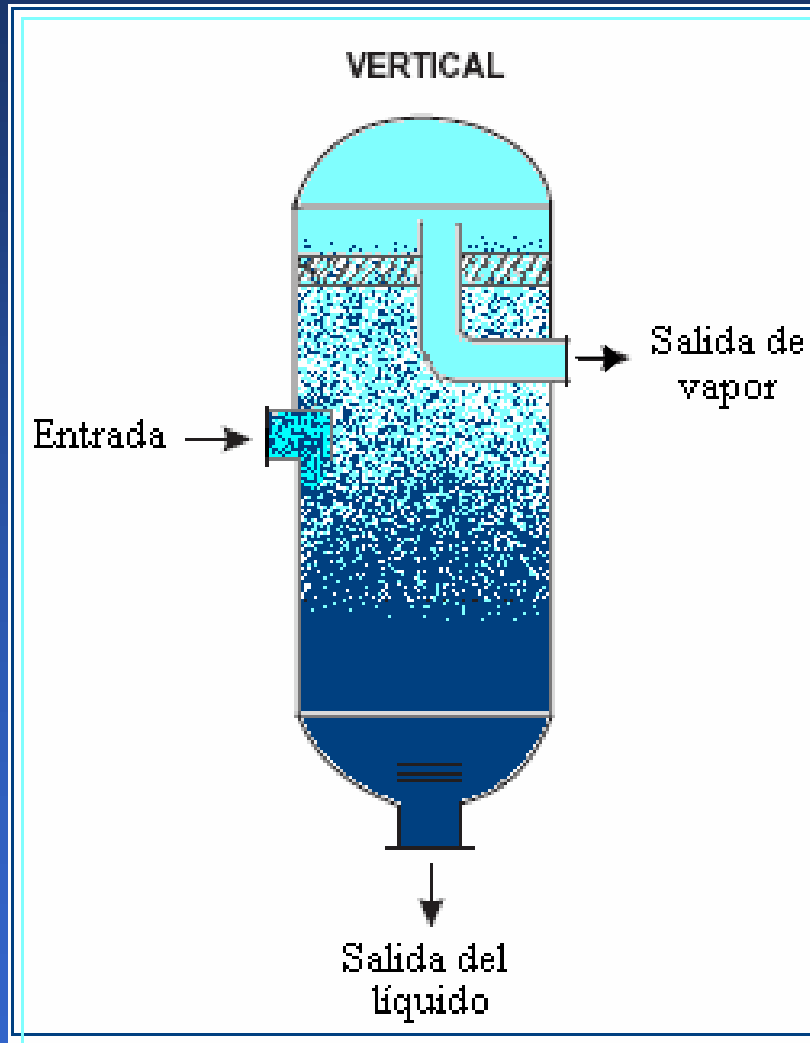
UNIVERSIDAD
METROPOLITANA
Enseñando el camino

Estado del Arte de las tecnologías utilizadas
para minimizar el arrastre de líquidos en separadores
líquido-vapor en un proceso de acondicionamiento de gas

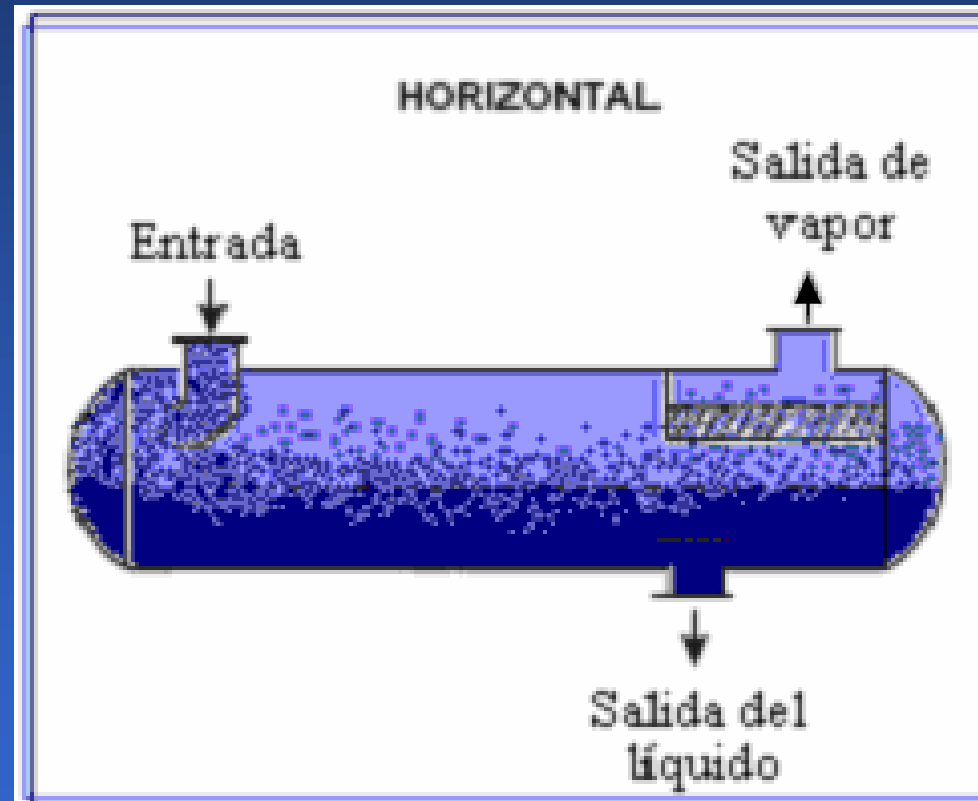


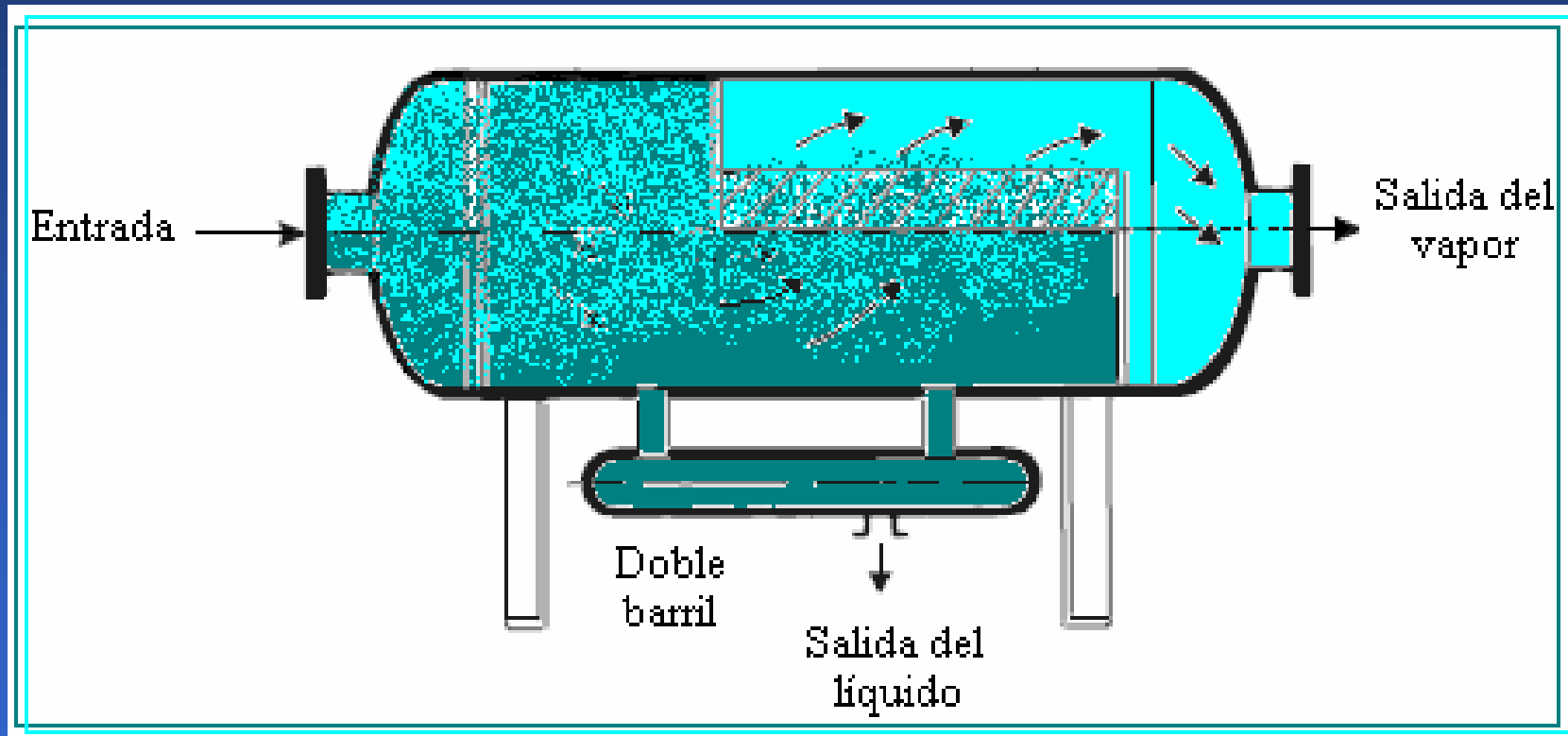
GRACIAS

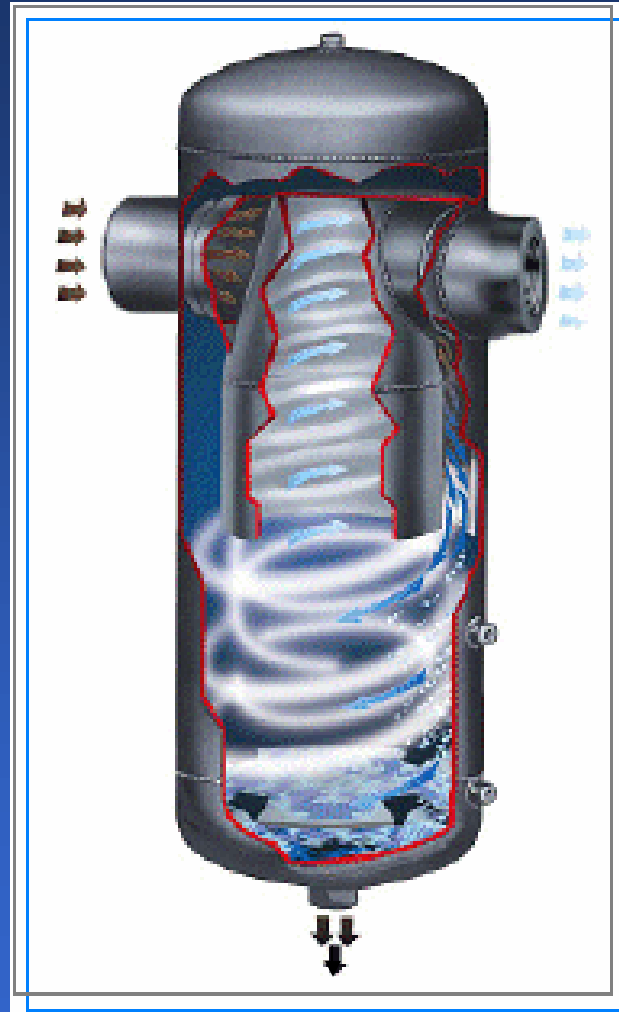




Fuente: Elaboración propia a partir del GPSA.

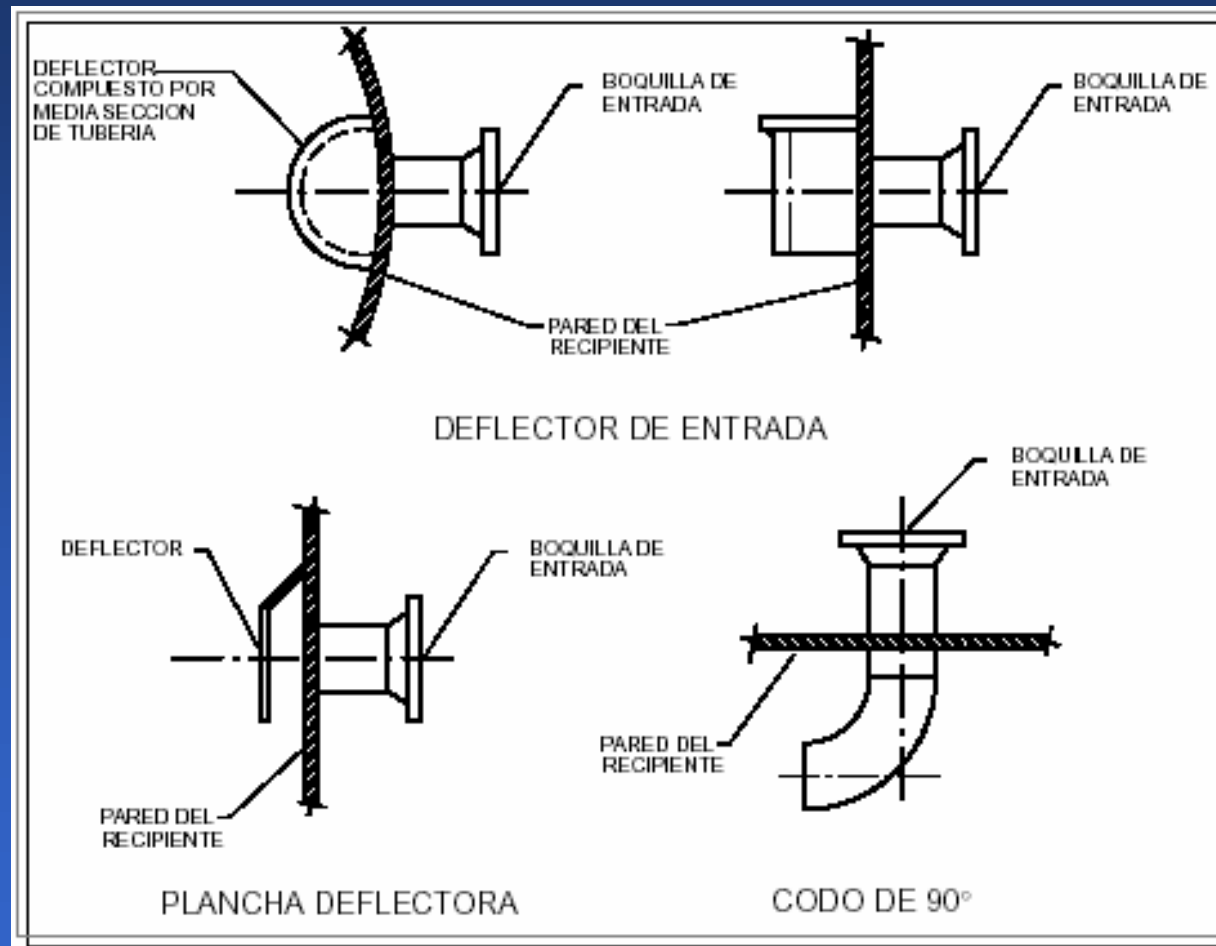




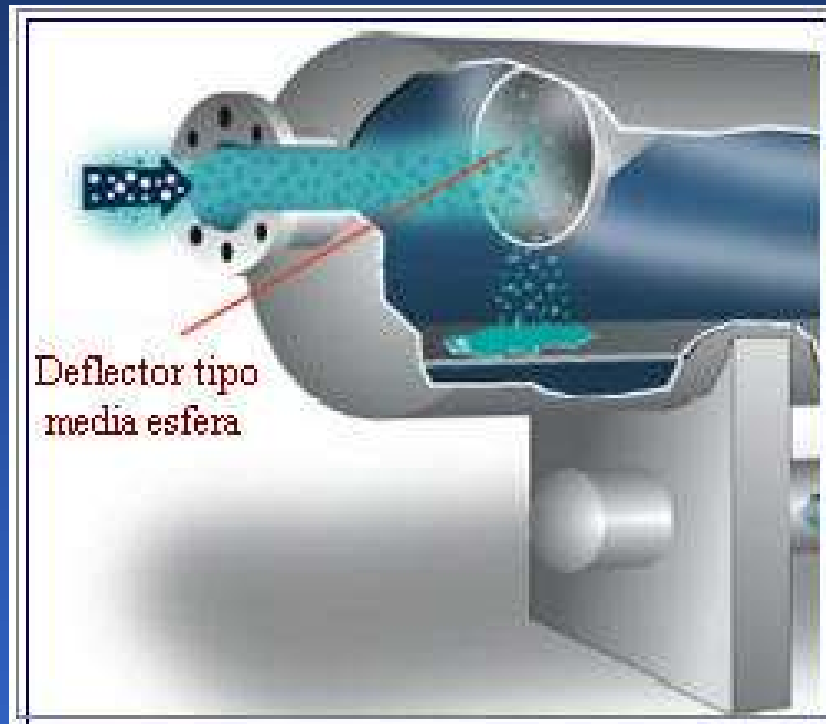


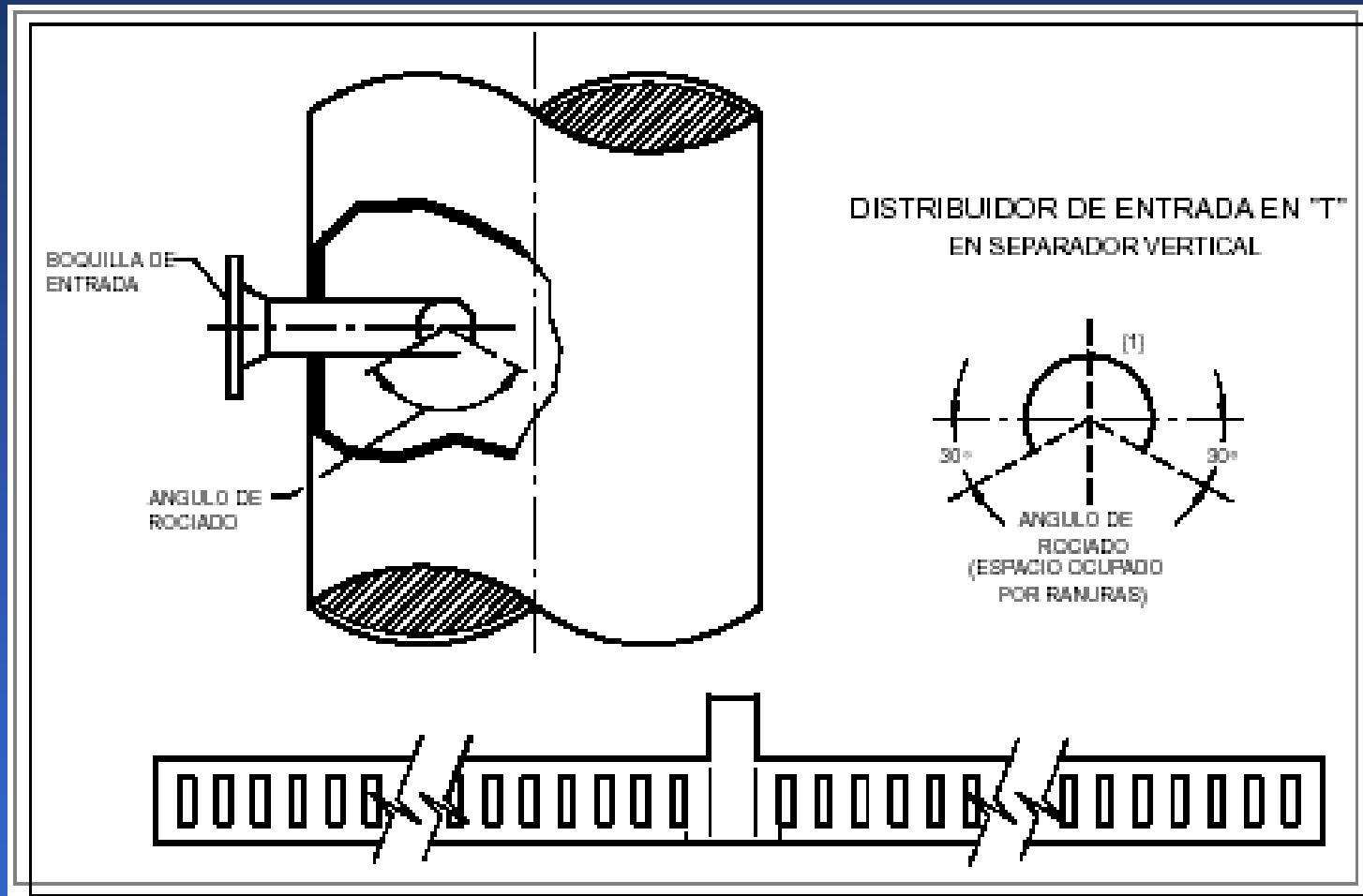


Estado del Arte de las tecnologías utilizadas para minimizar el arrastre de líquidos en separadores líquido-vapor en un proceso de acondicionamiento de gas

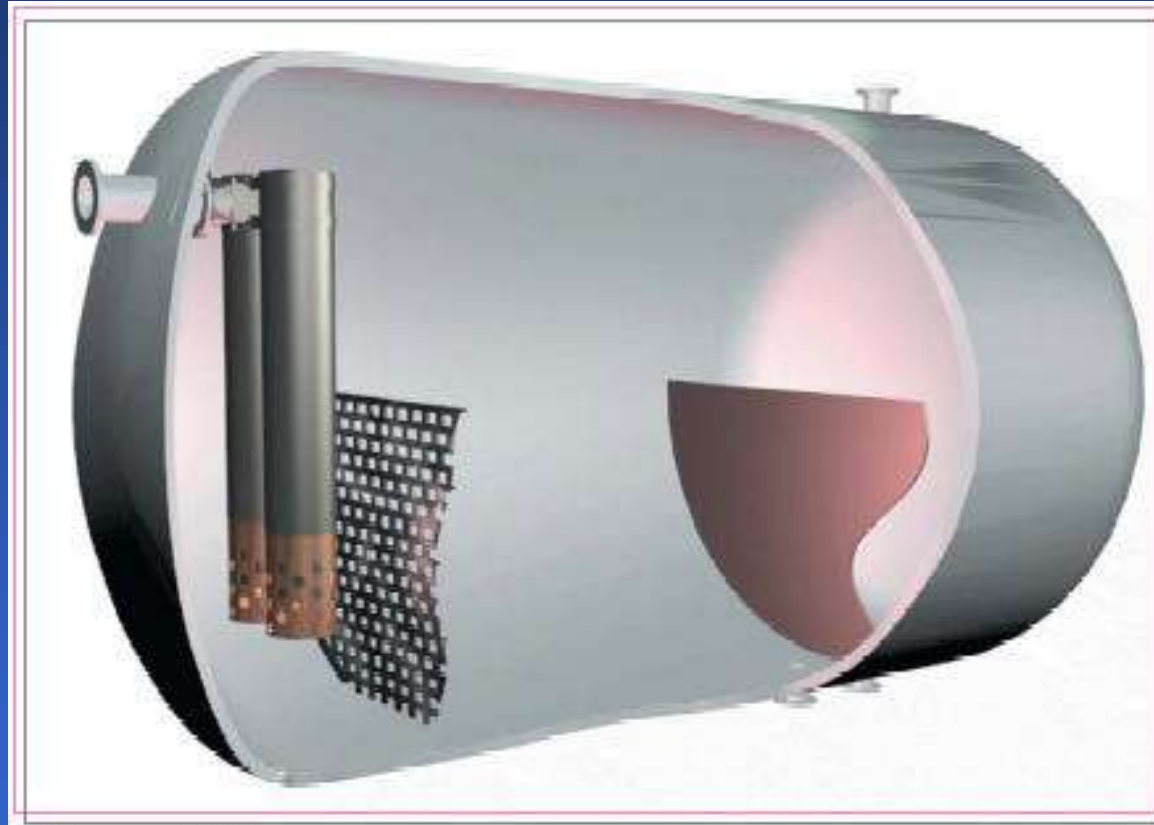


Fuente: PDVSA (1995a).





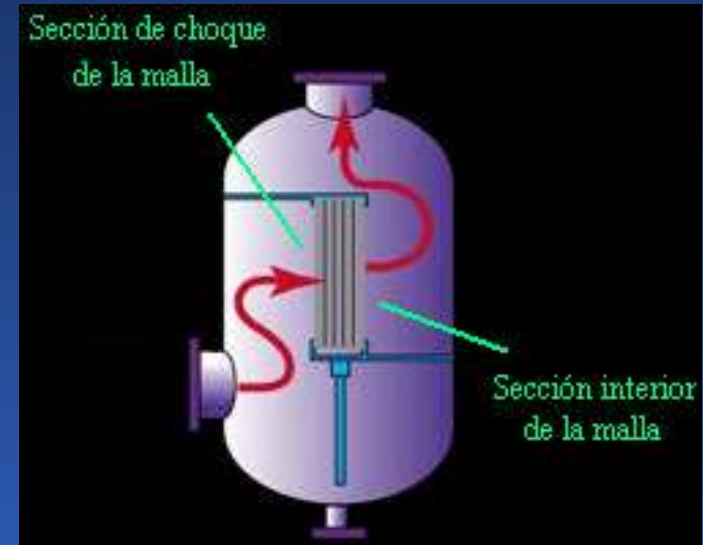
Estado del Arte de las tecnologías utilizadas para minimizar el arrastre de líquidos en separadores líquido-vapor en un proceso de acondicionamiento de gas



Fuente: Aker Kværner (1997).



Fuente: Amistco Separation Products, Inc. (2004).

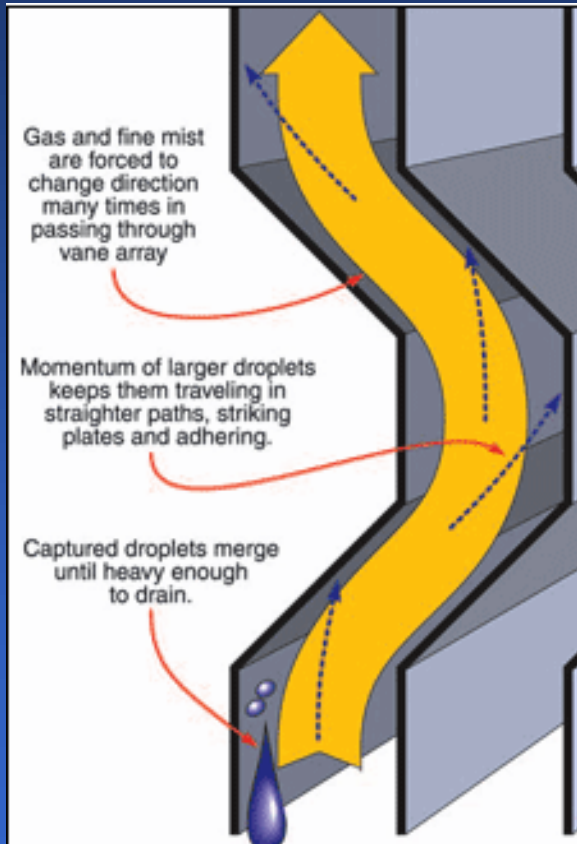


Fuente: Elaboración propia a partir de la figura de ACS Separations & Mass-Transfer Products.

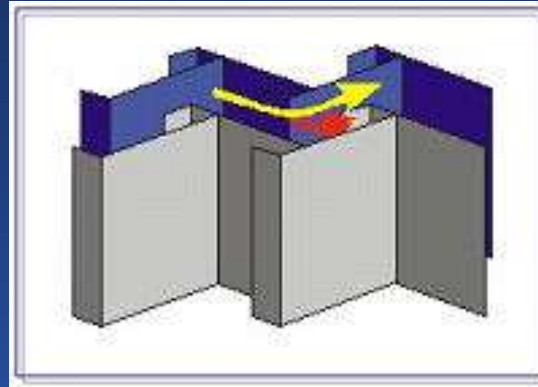


Fuente: Amistco Separation Products, Inc. (2004).

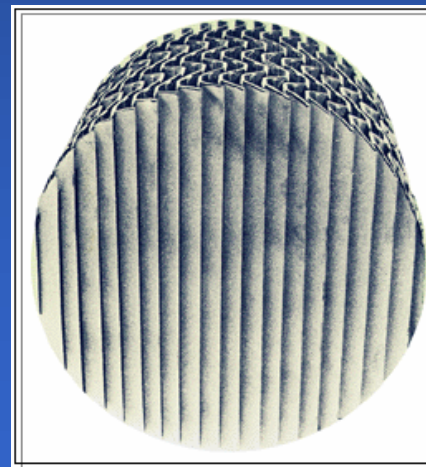
Las mallas pueden ser de forma rectangular o cilíndrica y ser colocadas en posición horizontal o vertical



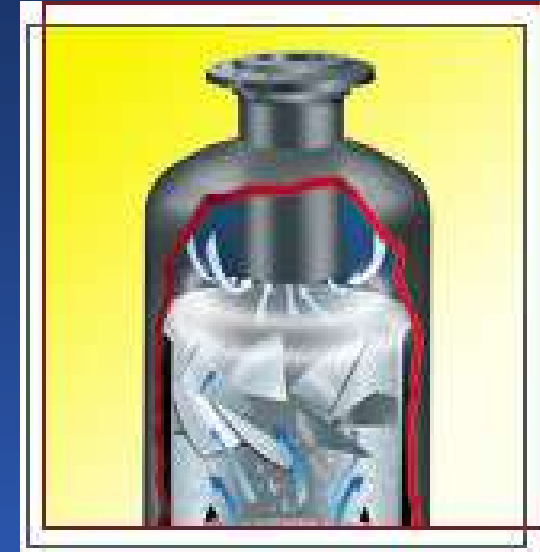
Fuente: Amisco Separation Products, Inc. (2004).



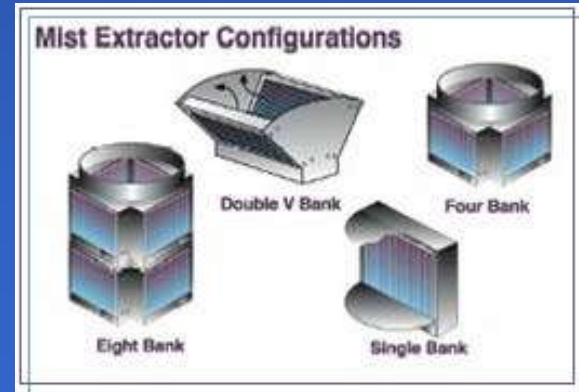
Fuente: <http://www.cdsengineering.com>



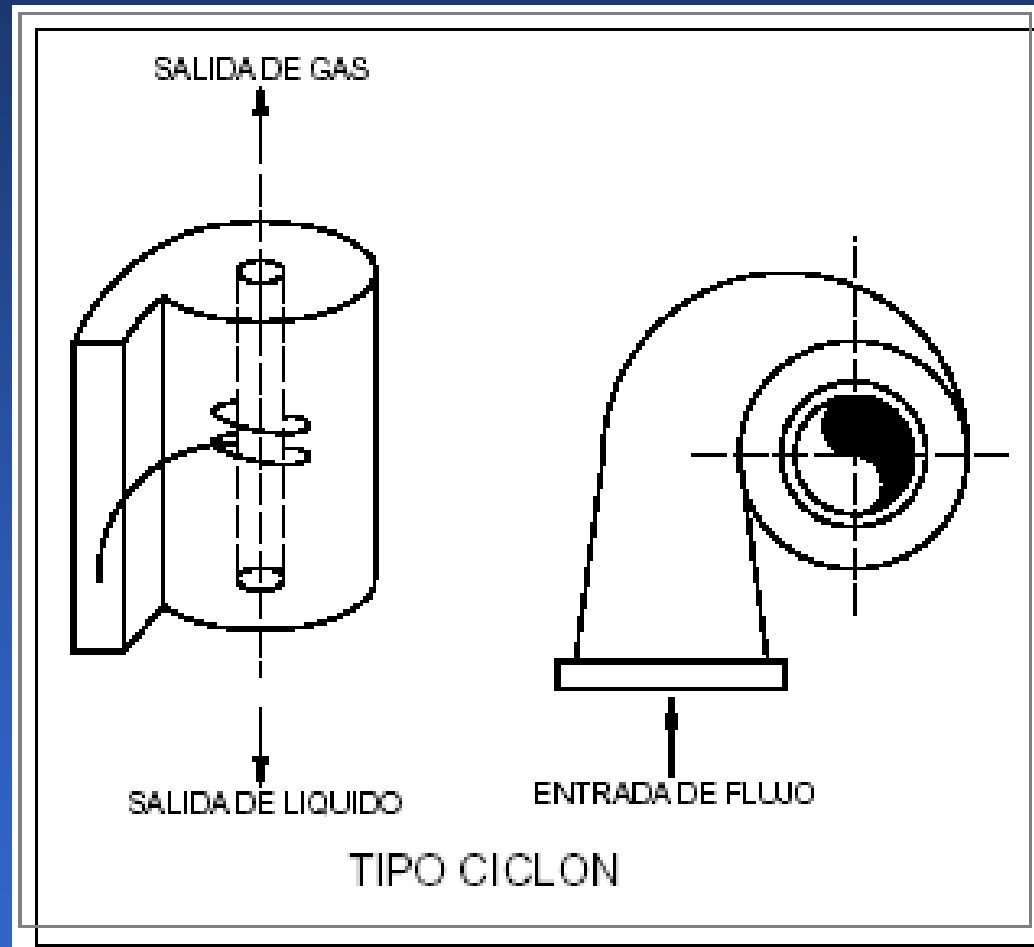
Fuente: <http://www.joyindustries.com>



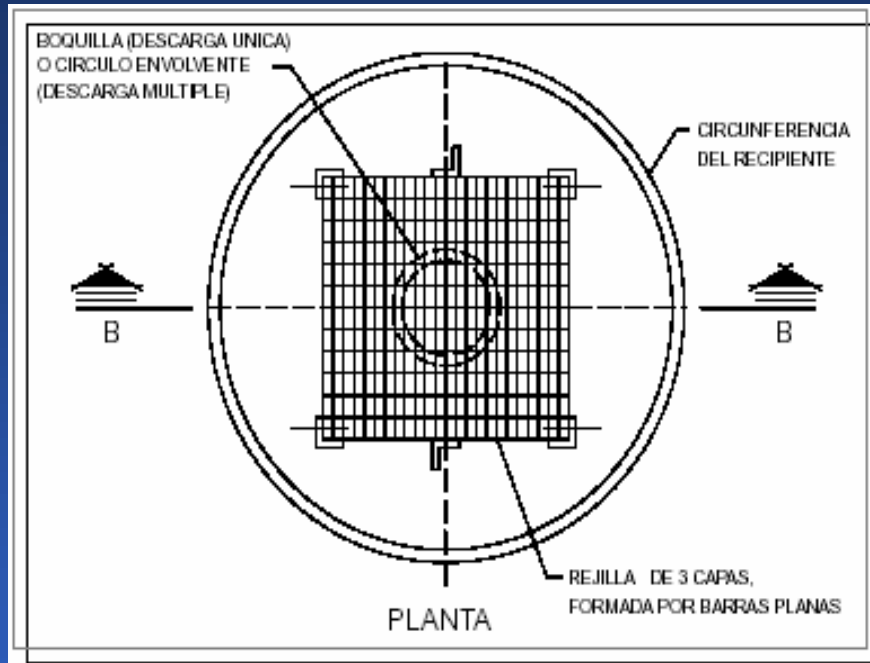
Fuente: <http://www.haywardindustrial.com>



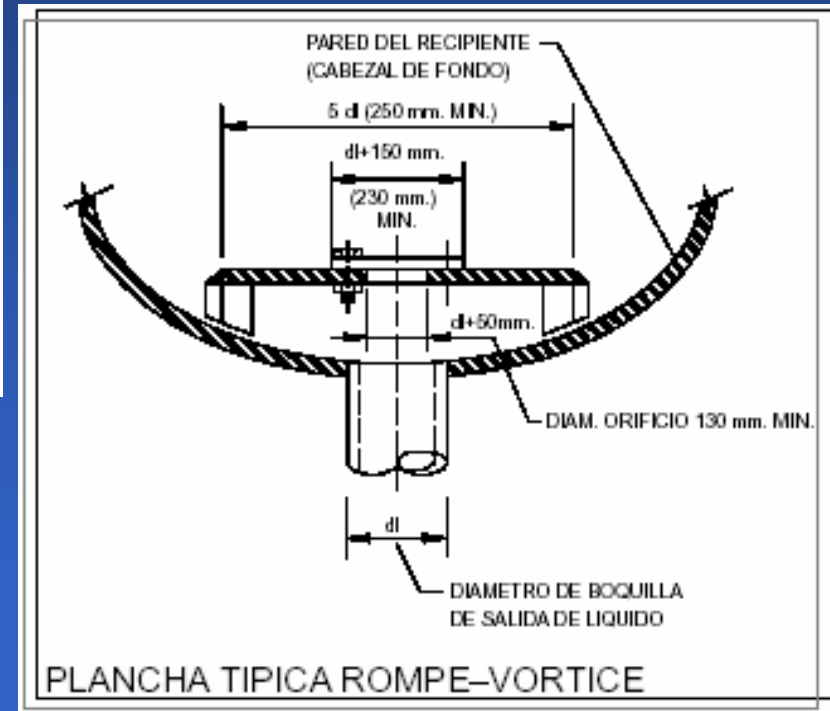
Fuente: <http://www.peerlessmfg.com>



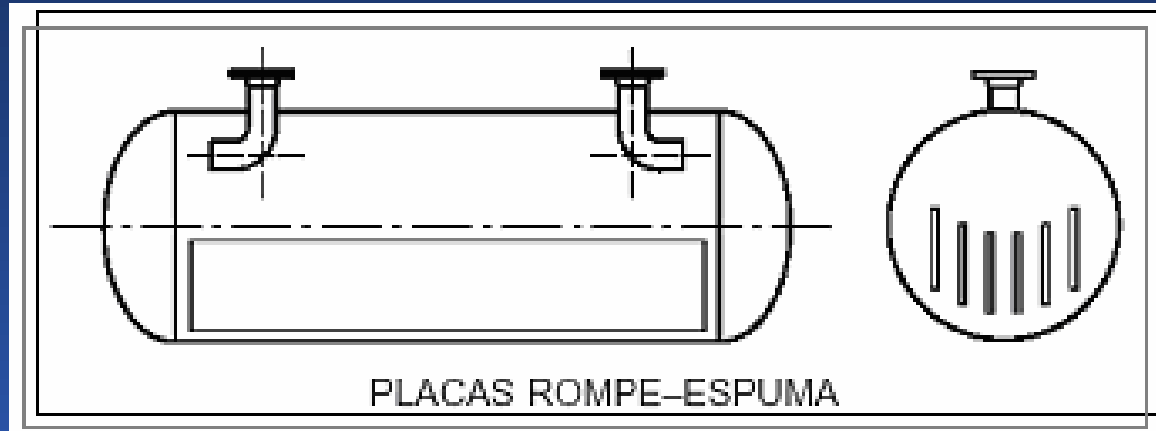
Fuente: PDVSA (1995a).



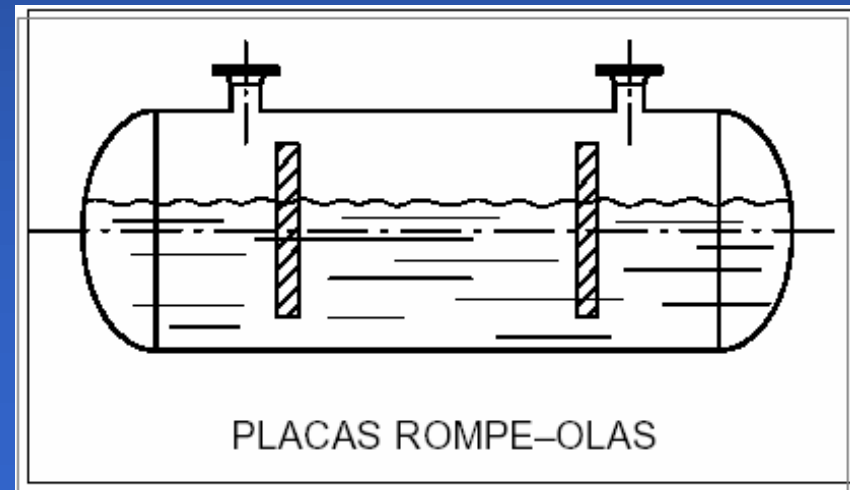
Fuente: PDVSA (1995b).

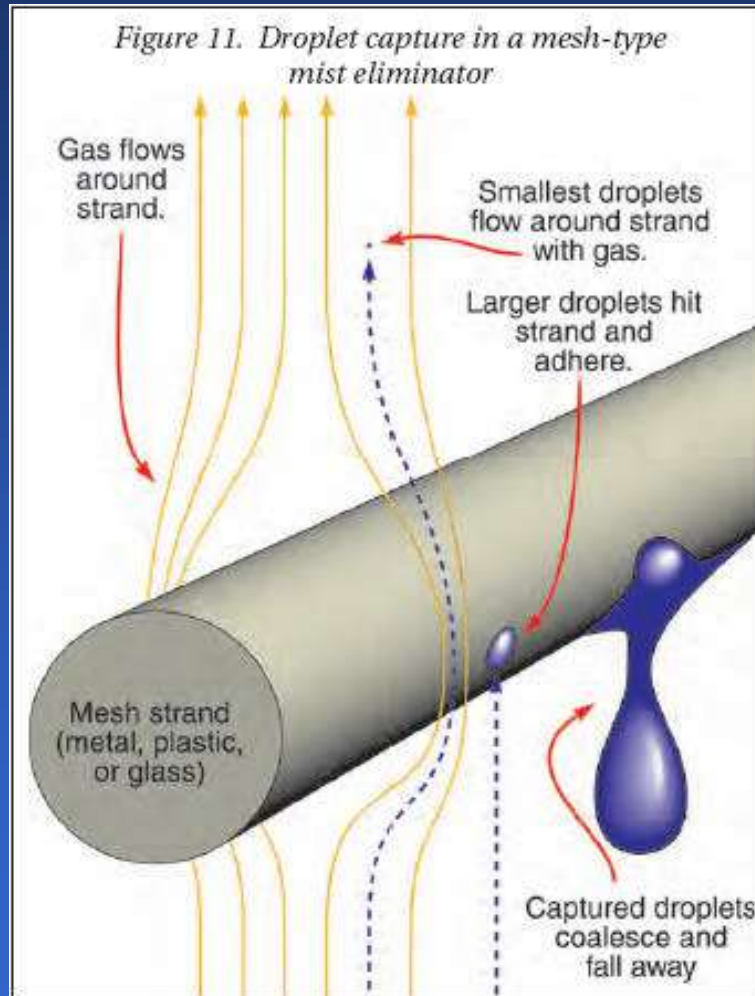


Fuente: PDVSA (1995b).

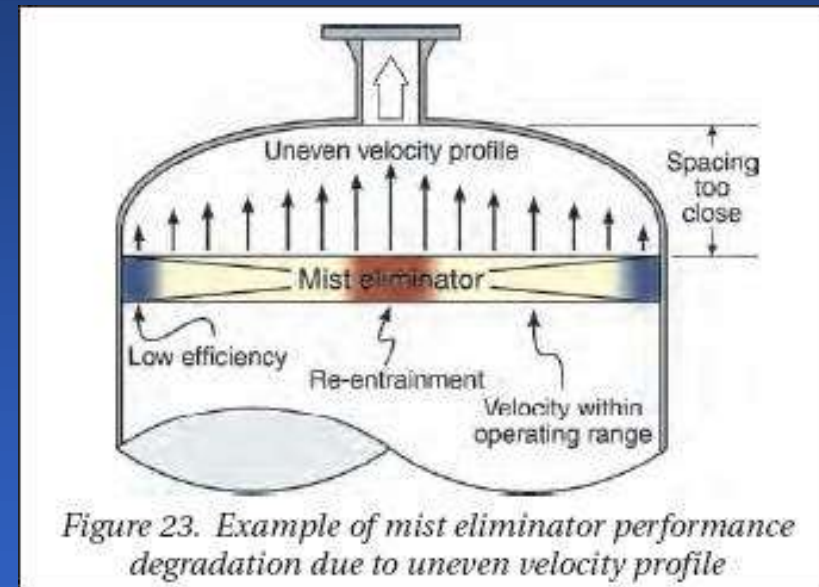


Fuente: PDVSA (1995a).

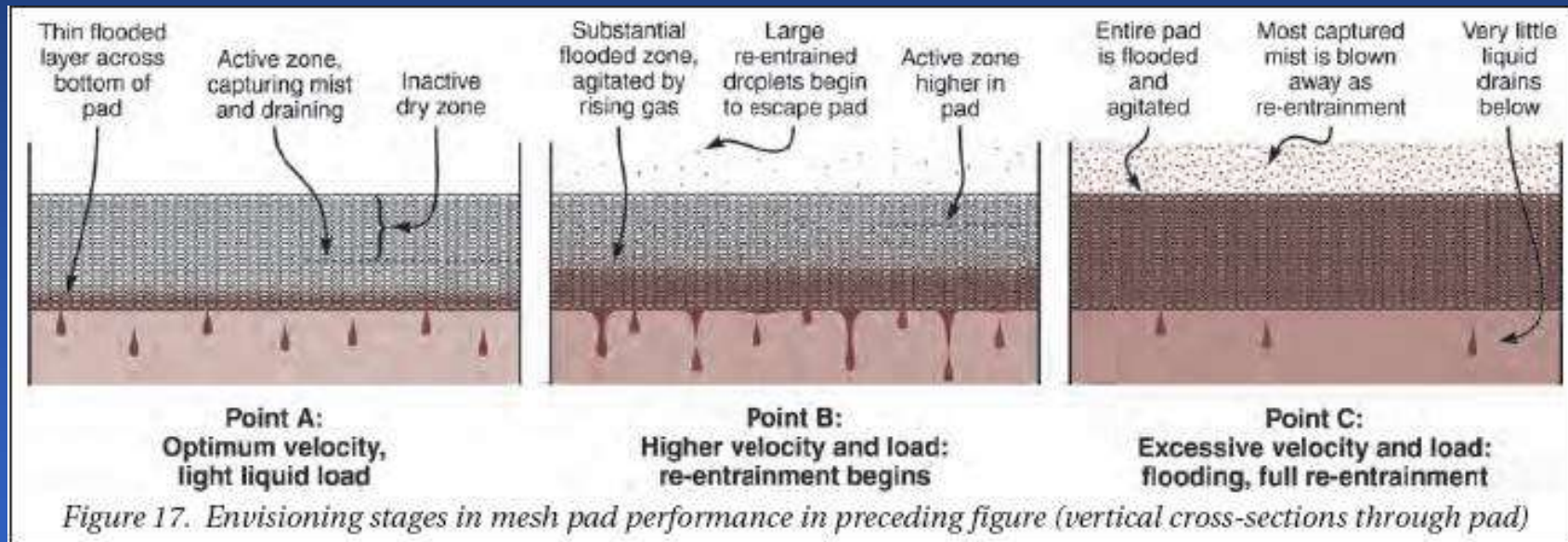




Fuente: <http://www.amistco.com>

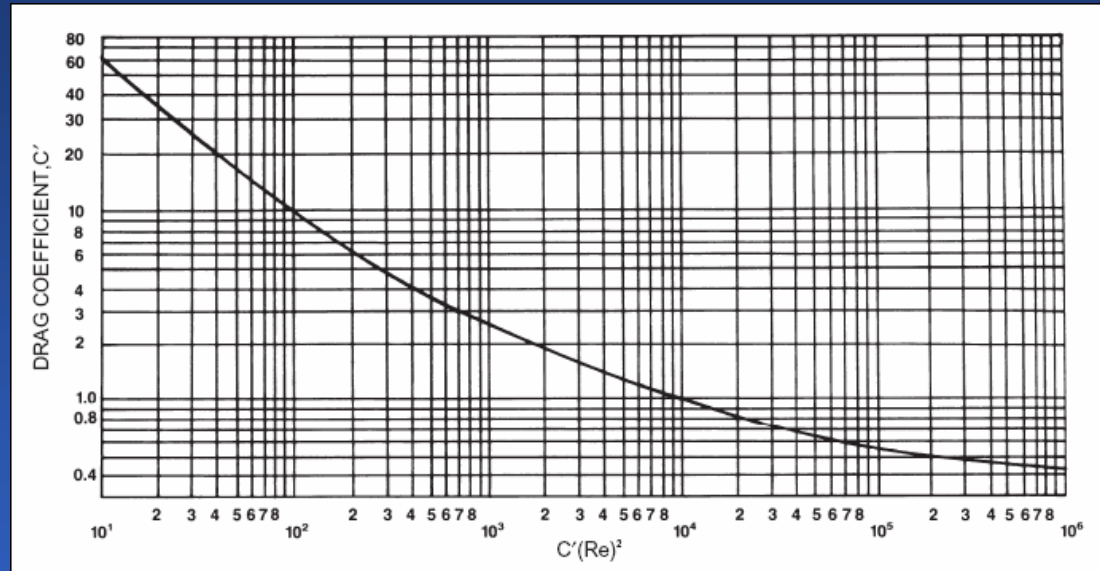


Fuente: <http://www.amistco.com>



Gráficamente

$$C_D \text{Re}^2 = \frac{0,95 \times 10^8 \cdot \rho_V \cdot D_P^3 \cdot (\rho_L - \rho_V)}{\mu_V^2}$$



Fuente: GPSA (1998).

Matemáticamente

$$C_D = e^{[6,4348 - 1,1457 \cdot \ln(X) + 0,0578 \cdot (\ln X)^2 - 9,4 \times 10^{-4} \cdot (\ln X)^3]}$$

Donde:

$$X = C_D \text{Re}^2$$

Tabla 8. Factor de corrección del "K" seleccionado, según el valor admisible en función de la presión de operación del separador.

| Presión (psia) | Factor de corrección |
|----------------|----------------------|
| 1 | 1 |
| 3 | 1 |
| 7 | 1 |
| 15 | 1 |
| 73 | 0,94 |
| 145 | 0,90 |
| 290 | 0,85 |
| 580 | 0,80 |
| 1160 | 0,75 |