

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESARROLLO DE UN PROGRAMA PARA EL DISEÑO DE SEPARADORES BIFÁSICOS Y TRIFÁSICOS, HORIZONTALES Y VERTICALES

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Ayesterán Q., Angel A.
para optar al Título de
Ingeniero Químico

Caracas, 2008

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESARROLLO DE UN PROGRAMA PARA EL DISEÑO DE SEPARADORES BIFÁSICOS Y TRIFÁSICOS, HORIZONTALES Y VERTICALES

Tutor académico: Prof. Trino Romero.

Tutor industrial: Ing. Fernando Urdaneta.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Ayesterán Q., Angel A.
para optar al Título de
Ingeniero Químico

Caracas, 2008

Caracas, Septiembre de 2008

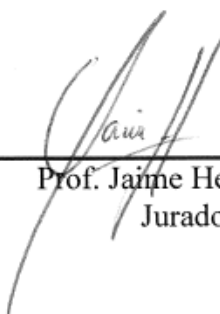
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Angel Alberto Ayesterán Quintana, titulado:

**“ DESARROLLO DE UN PROGRAMA PARA EL DISEÑO DE
SEPARADORES BIFÁSICOS Y TRIFÁSICOS,
HORIZONTALES Y VERTICALES”**

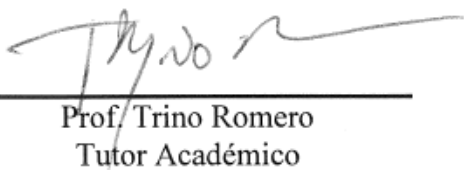
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al título de Ingeniero Químico, y sin que esto signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran **APROBADO**.



Prof. Alí Lara
Jurado



Prof. Jaime Hernández
Jurado



Prof. Trino Romero
Tutor Académico



Ing. Fernando Urdaneta
Tutor Industrial

Ayesterán Q., Angel A.

DESARROLLO DE UN PROGRAMA PARA EL DISEÑO DE SEPARADORES BIFÁSICOS Y TRIFÁSICOS, HORIZONTALES Y VERTICALES

Tutor académico: Prof. Trino Romero. Tutor industrial: Ing. Fernando Urdaneta. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. 2008, 158 pp.

Palabras claves: Separadores Bifásicos, Separadores Trifásicos, Dimensionamiento, Programa Visual Basic, VEPICA.

Resumen. El presente Trabajo Especial de Grado realizado en conjunto con la empresa de consultoría *Venezolana de Proyectos Integrados C.A. (VEPICA)*, busca la selección y unificación de los procedimientos y criterios de diseño requeridos para el dimensionamiento de los separadores bifásicos y trifásicos, horizontales y verticales más utilizados a nivel industrial, y la incorporación de estos elementos en un ambiente computacional haciendo uso de las hojas de cálculo disponibles en el software Microsoft Office Excel 2003®, y de la programación de algoritmos bajo el lenguaje Visual Basic for Application ®.

La validación del programa fue realizada en base a la comparación de los resultados obtenidos mediante la aplicación de las hojas de cálculo y otros software de diseño comerciales, para el dimensionamiento de dos separadores de producción y un depurador de gas enmarcados en el proyecto de ingeniería básica que actualmente *VEPICA* desarrolla para la empresa especialista en construcción de macollas y estaciones de flujo *MORIFUELS*. Adicionalmente, se empleó el programa para dimensionar otros separadores con datos reales extraídos de proyectos realizados anteriormente por la consultora.

Los resultados reportados por las hojas de cálculo dieron consistentes con los obtenidos mediante los diferentes software comerciales utilizados, generando dimensiones más pequeñas para los separadores calculados, con una desviación de hasta el 25% en cuanto al diámetro del cilindro y del 30% para la longitud, lo cual es aceptable como consecuencia de las diferencias en los criterios de diseño utilizados por los diversos programas en sus metodologías. De esta forma se concluye que las hojas de cálculo proporcionan resultados confiables y pueden ser utilizadas con fines prácticos.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	Pág.
Índice de Tablas	x
Índice de Figuras	xii
Lista de Abreviaturas	xv
Lista de Símbolos Griegos	xix
CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN	1
I.1.- Planteamiento del Problema	1
I.2.- Antecedentes	2
I.3.- Objetivos	4
I.3.1.- General	4
I.3.2.- Específicos	5
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	6
II.1.- Fundamentos Teóricos de la Separación de Fases	6
II.1.1.- Principios Físicos de la Separación	6
II.1.2.-Velocidad Crítica	7
II.2.- Etapas de la Separación de Fases	10
II.3.- Clasificación de los Separadores	11
II.3.1.- Separadores Horizontales	14
II.3.2.- Separadores Verticales	15
II.4.- Internos de un Separador	17
II.4.1.- Deflectores	17
II.4.2.- Schoepentoeter	17
II.4.3.- Eliminadores de Niebla	17
II.5.- Parámetros Involucrados en el Dimensionamiento de un Separador	19
II.6.- Correlaciones para el Dimensionamiento de Separadores	23

CONTENIDO	Pág.
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	26
III.1.- Separador Vertical Líquido-Vapor sin Extractor de Niebla	26
III.1.1.- Bases de Diseño	26
III.1.2.- Procedimiento de Cálculo	27
III.1.3.- Procedimiento de Ajuste	33
III.1.4.- Adicionales al Dimensionamiento del Separador	33
III.2.- Separador Vertical Líquido-Vapor con Extractor de Niebla	34
III.2.1.- Bases de Diseño	34
III.2.2.- Procedimiento de Cálculo	35
III.2.3.- Procedimiento de Ajuste	37
III.2.4.- Adicionales al Dimensionamiento del Separador	37
III.3.- Separador Vertical Líquido-Vapor con Aletas en 1 Etapa	38
III.3.1.- Bases de Diseño	38
III.3.2.- Procedimiento de Cálculo	39
III.3.3.- Procedimiento de Ajuste	43
III.4.- Separador Vertical Líquido-Vapor con Aletas en 2 Etapas	45
III.4.1.- Bases de Diseño	45
III.4.2.- Procedimiento de Cálculo	46
III.4.3.- Procedimiento de Ajuste	50
III.5.- Separador Horizontal Líquido-Vapor sin Extractor de Niebla	51
III.5.1.- Bases de Diseño	51
III.5.2.- Procedimiento de Cálculo	51
III.5.3.- Procedimiento de Ajuste	56
III.5.4.- Adicionales al Dimensionamiento del Separador	58

CONTENIDO	Pág.
III.6.- Separador Horizontal Líquido-Vapor con Extractor de Niebla	58
III.6.1.- Bases de Diseño	58
III.6.2.- Procedimiento de Cálculo	59
III.6.3.- Procedimiento de Ajuste	62
III.6.4.- Adicionales al Dimensionamiento del Separador	62
III.7.- Separador Horizontal Líquido-Líquido	62
III.7.1.- Bases de Diseño	62
III.7.2.- Procedimiento de Cálculo	62
III.7.3.- Procedimiento de Ajuste	66
III.8.- Separador Horizontal Líquido-Líquido-Vapor con Placa	67
III.8.1.- Bases de Diseño	67
III.8.2.- Procedimiento de Cálculo	68
III.8.3.- Procedimiento de Ajuste	74
III.9.- Separador Horizontal Líquido-Líquido-Vapor con Bota	77
III.9.1.- Bases de Diseño	77
III.9.2.- Procedimiento de Cálculo	78
III.9.3.- Procedimiento de Ajuste	84
CAPÍTULO IV. RESULTADOS	87
IV.1.- Características del Programa	87
IV.1.1.- Interfase Visual Basic	87
IV.1.2.- Hojas de Cálculo	89
IV.2.- Aplicación y Validación del Programa	92
IV.2.1.- Proyecto VEPICA-MORIFUELS	92
IV.2.2.- Casos Adicionales de Separadores	98

CONTENIDO	Pág.
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES	105
CAPÍTULO VI. RECOMENDACIONES	107
CAPÍTULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
CAPÍTULO VIII. APÉNDICES	110
APÉNDICE A. Dimensionamiento de Boquillas	111
A.1.- Boquilla de Alimentación	111
A.2.- Boquilla de Salida de la fase Vapor	112
A.3.- Boquilla de Salida de la Fase Líquida	112
APÉNDICE B. Dimensionamiento de Internos a la Entrada del Separador	113
B.1.- Dimensionamiento del Codo de 90°	113
B.2.- Dimensionamiento del Distribuidor en Forma de “T”	113
B.3.- Dimensionamiento de la Placa Deflectora	116
APÉNDICE C. Conversión entre la Altura del Cilindro y el Área Transversal .	117
APÉNDICE D. Resultados del Programa	118
D.1.- Separador Horizontal Líquido-Vapor con Extractor de Niebla Tipo Malla (Separador de Producción)	118
D.2.- Separador Vertical Líquido-Vapor con Extractor de Niebla Tipo Malla (Depurador de Gas)	120
D.3.- Separador Vertical Líquido-Vapor con Caja de Aletas (1 Etapa) .	122
D.4.- Separador Vertical Líquido-Vapor con Caja de Aletas (2 Etapas).	125
D.5.- Separador Horizontal Líquido-Líquido-Vapor con Placa	128

CONTENIDO	Pág.
APÉNDICE E. Cálculos Tipos para el Dimensionamiento de los Separadores de Producción y el Depurador de Gas	130
E.1.- Separador Horizontal Líquido-Vapor con Extractor de Niebla Tipo Malla (Separador de Producción)	130
E.2.- Separador Vertical Líquido-Vapor con Extractor de Niebla Tipo Malla (Depurador de Gas)	134
CAPITULO IX. ANEXOS	138

ÍNDICE DE TABLAS

CONTENIDO	Pág.
Tabla 1. Correlaciones para las principales dimensiones de separadores	23
Tabla 2. Valores típicos de K_S para la separación Líquido-Líquido	63
Tabla 3. Datos iniciales para el diseño del separador de producción	92
Tabla 4. Datos iniciales para el diseño del depurador de gas	93
Tabla 5. Resultados para el dimensionamiento del separador de producción, seleccionando la disposición horizontal líquido-vapor con malla extractora de niebla	93
Tabla 6. Resultados para el dimensionamiento del depurador de gas, seleccionando la disposición vertical líquido-vapor con malla extractora de niebla	94
Tabla 7. Comparación entre los resultados del separador de producción obtenidos con el programa elaborado y los otros softwares comerciales utilizados	95
Tabla 8. Comparación entre los resultados del depurador de gas obtenidos con el programa elaborado y otro software comercial utilizado	95
Tabla 9. Valores de la constante de velocidad crítica (k) arrojados tanto por el programa en estudio como por el software comercial	96
Tabla 10. Variación de las dimensiones del separador de producción obtenidas con el programa en estudio, en función de la relación longitud-diámetro del separador asumida $(L/D)_A$	97
Tabla 11. Datos iniciales para el diseño de un separador vertical bifásico (líquido-vapor) con paquete de aletas en 1 etapa	99
Tabla 12. Resultados para el dimensionamiento del separador vertical bifásico (líquido-vapor) con paquete de aletas en 1 etapa	99

CONTENIDO	Pág.
Tabla 13. Comparación entre los resultados del separador vertical bifásico (líquido-vapor) con paquete de aletas en 1 etapa, obtenidos con la hoja de cálculo y otro software comercial utilizado	100
Tabla 14. Datos iniciales para el diseño de un separador vertical bifásico (líquido-vapor) con paquete de aletas en 2 etapas	101
Tabla 15. Resultados para el dimensionamiento del separador vertical bifásico (líquido-vapor) con paquete de aletas en 2 etapas	101
Tabla 16. Comparación entre los resultados del separador vertical bifásico (líquido-vapor) con paquete de aletas en 2 etapas, obtenidos con la hoja de cálculo y otro software comercial utilizado	102
Tabla 17. Datos iniciales para el diseño de un separador horizontal trifásico (líquido-líquido-vapor) con placa	103
Tabla 18. Resultados para el dimensionamiento del separador horizontal trifásico (líquido-líquido-vapor) con placa	103
Tabla 19. Comparación entre los resultados del separador horizontal trifásico (líquido-líquido-vapor) con placa, obtenidos con la hoja de cálculo y otro software comercial utilizado	104

ÍNDICE DE FIGURAS

CONTENIDO	Pág.
Figura 1. Zonas de separación	12
Figura 2. Separadores encontrados en una estación de Producción Superficial	13
Figura 3. Separadores Horizontales	14
Figura 4. Separadores Verticales	16
Figura 5. Distribución de la velocidad de entrada con una boquilla normal y un Schoepentoeter	18
Figura 6. Eliminadores de niebla tipo malla	19
Figura 7. Eliminadores de niebla tipo aleta	19
Figura 8. Esquema de un separador bifásico vertical líquido-vapor sin eliminador de niebla	32
Figura 9. Esquema de un separador bifásico vertical líquido-vapor con eliminador de niebla tipo malla	38
Figura 10. Esquema de un separador bifásico vertical líquido-vapor con paquete de aleta en una etapa	44
Figura 11. Esquema de un separador bifásico vertical líquido-vapor con paquete de aleta en dos etapas	50
Figura 12. Esquema de un separador bifásico horizontal líquido-vapor sin eliminador de niebla	56
Figura 13. Esquema de un separador bifásico horizontal líquido-vapor con eliminador de niebla tipo malla	61
Figura 14. Esquema de un separador bifásico horizontal líquido-líquido	66
Figura 15. Esquema de un separador trifásico horizontal líquido-líquido-vapor con placa decantadora	74
Figura 16. Esquema de un separador trifásico horizontal líquido-líquido-vapor con bota	83

CONTENIDO	Pág.
Figura 17. Pantalla de presentación del programa	88
Figura 18. Pantalla de Selección del Tipo de Separador según las Fases a Separar	88
Figura 19. Pantalla de Selección de la Disposición del Separador e Introducción de los Datos Iniciales para su respectivo Diseño ...	89
Figura 20. Resultado esquemático del dimensionamiento del separador	90
Figura 21. Botones de acción dentro de las hojas de cálculo	91
Figura B1. Dimensiones de un distribuidor de ranuras	115
Figura B2. Dimensiones de una placa deflectora	116
Figura D1. Pantalla de Introducción de los Datos Iniciales para el Diseño del Separador Horizontal Líquido-Vapor con Malla Eliminadora de Niebla	118
Figura D2. Pantalla de Resultados del Diseño del Separador Horizontal Líquido-Vapor con Malla Eliminadora de Niebla	119
Figura D3. Pantalla de Introducción de los Datos Iniciales para el Diseño del Separador Vertical Líquido-Vapor con Malla Eliminadora de Niebla	120
Figura D4. Pantalla de Resultados del Diseño del Separador Vertical Líquido-Vapor con Malla Eliminadora de Niebla	121
Figura D5. Pantalla de Introducción de los Datos Iniciales para el Diseño del Separador Vertical Líquido-Vapor con Aletas en 1 Etapa	122
Figura D6. Pantalla de Resultados del Diseño del Separador Vertical Líquido-Vapor con Aletas en 1 Etapa	123
Figura D7. Pantalla de Resultados del Diseño del Paquete de Aletas para el Separador en 1 Etapa	124

CONTENIDO	Pág.
Figura D8. Pantalla de Introducción de los Datos Iniciales para el Diseño del Separador Vertical Líquido-Vapor con Aletas en 2 Etapas ...	125
Figura D9. Pantalla de Resultados del Diseño del Separador Vertical Líquido-Vapor con Aletas en 2 Etapas	126
Figura D10. Pantalla de Resultados del Diseño del Paquete de Aletas para el Separador en 2 Etapas	127
Figura D11. Pantalla de Introducción de los Datos Iniciales para el Diseño del Separador Horizontal Líquido-Líquido-Vapor con Placa	128
Figura D12. Pantalla de Resultados del Diseño del Separador Horizontal Líquido-Líquido-Vapor con Placa	129

LISTA DE ABREVIATURAS

$^{\circ}API$ = gravedad API, [$^{\circ}API$].

$\%Diseño$ = porcentaje de sobre diseño para el flujo de vapor, [%].

A_{fluido} = área transversal ocupada por el fluido, [ft^2].

A_G = área transversal ocupada por la fase vapor, [ft^2].

A_{NBL} = área transversal ocupada por el nivel bajo de líquido, [ft^2].

A_{NNL} = área transversal correspondiente al nivel normal de líquido, [ft^2].

A_{Lh} = área transversal ocupada por la fase pesada, [ft^2].

A_{LL} = área transversal ocupada por la fase liviana, [ft^2].

Ar = número de Arquímedes, [adim].

A_{LLS} = área transversal ocupada por la fase liviana en el separador, [ft^2].

A_{ran} = área de la ranura del distribuidor, [in^2].

A_T = área transversal total del separador, [ft^2].

A_v = área superficial de la vena, [ft^2].

C_D = coeficiente de arrastre, [adim].

D = diámetro del separador, [ft].

D_B = diámetro de la bota, [ft].

D_C = diámetro del codo de 90° , [in].

d_{LH} = diámetro de la boquilla de salida de la fase líquida pesada, [in].

d_{LL} = diámetro de la boquilla de salida de la fase líquida liviana, [in].

d_{NE} = diámetro de la boquilla de entrada, [in].

d_{NG} = diámetro de la boquilla de salida de la fase vapor, [in].

d_{NL} = diámetro de la boquilla de salida de la fase líquida, [in].

d_{ran} = separación entre las ranuras del distribuidor, [in].

D_p = diámetro de partícula o gota de líquido, [micrones].

d_{PD} = ancho de la placa deflectora, [in].

g = constante de la fuerza de gravedad, [ft/s^2].

$g.s.$ = gravedad específica, [adim].

H = altura de separador, [ft].

H_D = altura desde la línea central de la boquilla de entrada hasta el fondo del extractor de niebla o la tangente superior del separador (caso sin extractor de niebla), [ft].

H_{fluido} = altura ocupada por el fluido, [ft].

H_G = altura ocupada por la fase vapor, [ft].

H_H = altura de Holdup, [ft].

H_L = altura de líquido, [ft].

H_{LL} = altura correspondiente a la fase líquida liviana, [ft].

H_{LLB} = altura correspondiente a la fase líquida liviana en la bota, [ft].

H_{LIN} = altura entre el nivel alto de líquido y la línea central de la boquilla de entrada, [ft].

H_{LLS} = altura correspondiente a la fase líquida liviana en el separador, [ft].

H_{LH} = altura correspondiente a la fase líquida pesada, [ft].

H_{ME} = altura desde el fondo del eliminador de niebla hasta el tope del separador, [ft].

H_{NAL} = altura correspondiente al nivel alto de líquido, [ft].

H_{NBL} = altura correspondiente al nivel bajo de líquido, [ft].

H_{NNL} = altura correspondiente al nivel normal de líquido, [ft].

H_P = altura del Schoepentoeter, [ft].

H_{PD} = altura de la placa deflectora, [in].

H_S = altura de Surge, [ft].

H_v = altura de la vena, [ft].

H_{vb} = altura del paquete de vena, [ft].

H_W = altura de la placa, [ft].

I_{ran} = longitud de la ranura del distribuidor, [in].

K = constante de la velocidad crítica, [ft/s].

K_S = constante de la velocidad de asentamiento, [(in/min).(cP)/(lb/ft³)].

L = longitud del separador, [ft].

L_1 = longitud mínima para lograr la separación entre las fases líquidas, [ft].

L_2 = longitud de la zona de almacenamiento de la fase líquida liviana, [ft].

L_{CC} = distancia de un codo corto desde el extremo soldado al centro de descarga, [in].

L_{CL} = distancia de un codo largo desde el extremo soldado al centro de descarga, [in].

L_{dis} = longitud del distribuidor, [in].

L_{PD} = separación entre la boquilla y la placa deflectora, [in].

L/D = relación entre la longitud y el diámetro del separador calculada, [adim].

$(L/D)_A$ = relación entre la longitud y el diámetro del separador asumida, [adim].

L_{MIN} = longitud mínima para la separación líquido-vapor, [ft].

N_S = número de ranuras en el distribuidor, [adim].

P = presión de operación, [psia].

PM = peso molecular de la fase vapor, [lb/lb-mol].

Q_{max}^* = flujo volumétrico máximo de vapor, [ft³/s].

Q_{GA} = flujo volumétrico de vapor a las condiciones actuales, [ft³/s]

Q_{GS} = flujo volumétrico de vapor a las condiciones estándares, [MMSCFD].

Q_L = flujo volumétrico de la fase líquida, [ft³/s].

Q_{LH} = flujo volumétrico de la fase pesada, [ft³/s].

Q_{LL} = flujo volumétrico de la fase liviana, [ft³/s].

Q_M = flujo volumétrico de la mezcla en la alimentación, [ft³/s].

S_{ran} = ancho de la ranura del distribuidor, [in].

T = temperatura de operación, [°R].

t_H = tiempo de Holdup, [min].

t_{LL} = tiempo de separación de la fase liviana, [min].

t_{LH} = tiempo de separación de la fase pesada, [min].

t_R = tiempo de residencia de la fase líquida, [min].

t_S = tiempo de Surge, [min].

t_{vb} = profundidad del paquete de vena, [ft].

U_A = velocidad de asentamiento, [in/min].

U_{ALL} = velocidad de separación de la fase liviana en la fase pesada, [ft/min].

U_{ALH} = velocidad de separación de la fase pesada en la fase liviana, [ft/min].

U_B = velocidad del fluido en la bota, [in/min].

U_C = velocidad crítica, [ft/s].

U_E = velocidad máxima en el distribuidor para que no ocurra arrastre de líquido, [ft/s].

U_G = velocidad de vapor, [ft/s].

U_{GA} = velocidad actual de vapor, [ft/s].

U_{LL} = velocidad del fluido en la boquilla de salida de la fase líquida liviana, [in/min].

U_{LH} = velocidad del fluido en la boquilla de salida de la fase líquida pesada, [in/min].

U_{NE} = velocidad del fluido en la boquilla de entrada, [ft/s].

U_{NG} = velocidad del fluido en la boquilla de salida de la fase vapor, [ft/s].

U_{NL} = velocidad del fluido en la boquilla de salida de la fase líquida, [ft/s].

V_H = volumen de Holdup, [ft³].

V_S = volumen de Surge, [ft³].

W_G = flujo másico de la fase vapor, [lb/h].

W_{LL} = flujo másico de la fase liviana, [lb/h].

W_{LH} = flujo másico de la fase pesada, [lb/h].

W_v = ancho de la vena, [ft].

W_{vb} = ancho del paquete de vena, [ft].

x = variable independiente del método de la cuerda, [adim].

X_1 = altura entre el nivel alto de líquido y el fondo del paquete de vena, [ft].

X_2 = altura desde el tope del paquete de vena hasta la tangente superior del
separador, [ft].

y = variable dependiente del método de la cuerda, [adim].

Y_1 = altura entre el nivel alto de líquido y el fondo del plato perforado, [ft].

Y_2 = altura entre el tope del plato perforado y el fondo del paquete de vena, [ft].

Y_3 = altura desde el tope del paquete de vena hasta la tangente superior del
separador, [ft].

z = factor de compresibilidad, [adim].

LISTA DE SIMBOLOS GRIEGOS

- θ_{feed} = parámetro de flujo de la alimentación, [adim].
- θ_{LL} = tiempo de residencia de la fase liviana, [min].
- θ_{LH} = tiempo de residencia de la fase pesada, [min].
- θ_v = parámetro de flujo en la cara de la vena, [adim].
- $\lambda_{Gmáx}$ = máximo factor de carga de vapor permitido, [ft/s].
- λ_{max} = parámetro Shoepentoeter, [ft/s].
- μ = viscosidad de la fase continua, [cP].
- μ_G = viscosidad de la fase vapor, [cP].
- μ_L = viscosidad de la fase líquida, [cP].
- ρ_G = densidad de la fase vapor, [lb/ft³].
- ρ_L = densidad de la fase líquida, [lb/ft³].
- ρ_{LH} = densidad de la fase líquida pesada, [lb/ft³].
- ρ_M = densidad de la mezcla de alimentación, [lb/ft³].
- σ = tensión interfacial entre el líquido y vapor, [dinas/cm].
- ϕ = tiempo de separación de las fases líquido y vapor, [s].

CAPÍTULO I: Fundamentos de la Investigación

En este capítulo se presentan las bases que sustentan el presente Trabajo Especial de Grado, comenzando por el problema a resolver y los aspectos de interés contenidos en trabajos previos que aporten información útil y, por último, los objetivos a alcanzar al finalizar el presente trabajo.

I.1.- Planteamiento del problema

Actualmente, la empresa de consultoría Venezolana de Proyectos Integrados VEPICA, pretende implantar dentro del departamento de Ingeniería de Procesos la elaboración de herramientas de cálculo orientados al dimensionamiento de equipos dentro del diseño básico de proyectos de ingeniería, las cuales faciliten la realización y ejecución de los métodos de cálculo involucrados con la precisión que ofrece el uso de un sistema computarizado.

Uno de los principales equipos encontrados en la mayoría de los procesos químicos, petroquímicos y petroleros son los separadores. Los separadores son recipientes en los cuales corrientes multifásicas son separadas en sus diferentes fases mediante cambios bruscos de volumen y momentum, a la vez que se garantiza el volumen y el tiempo necesario para que ocurra dicha separación. Estos equipos son utilizados para llevar las corrientes de proceso y servicio a las especificaciones deseadas en las diferentes etapas de procesamiento.

MORIFUELS S.A, compañía dedicada a la construcción y operación de pozos, macollas y estaciones de flujo, pretende realizar el diseño de la estación de flujo VK-3, proyecto a desarrollarse en el Estado Monagas, para manejar una capacidad establecida de 140 MBPSD de Bitumen húmedo diluido (WDB) y alrededor de 23 MMSCFD de gas asociado. Esta estación entre sus unidades contempla, dos separadores de producción y un depurador de gas. La ingeniería básica de estos equipos será realizada por la consultora VEPICA.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, en el presente estudio se busca la incorporación de las bases y criterios de diseño de separadores horizontales y verticales, bifásicos y trifásicos encontrados en la bibliografía, y los métodos de cálculo involucrados en el dimensionamiento de estos equipos, en hojas de cálculo elaboradas en Microsoft Office Excel 2003 ® mediante el empleo y la programación de subrutinas (macros), que permitan obtener una respuesta rápida y precisa bajo los criterios deseados por el cliente. La herramienta generada se validará mediante el dimensionamiento de los Separadores de Producción, y el Depurador de Gas del proyecto a desarrollarse por MORIFUELS S.A.

Este compendio de hojas de cálculo y macros será de gran ayuda para la empresa, en la elaboración de la ingeniería básica de futuros proyectos que involucren el dimensionamiento de separadores, facilitando la ejecución de los cálculos iterativos incluidos en la metodología de diseño, optimizando el tiempo y generando una hoja con el historial de los cálculos realizados.

I.2.- Antecedentes

En la actualidad numerosas empresas petroleras contienen metodologías particulares para el diseño de separadores según datos obtenidos de la experiencia y la práctica, pero esta información es confidencial y no puede ser utilizada sin permiso previo. Sin embargo, existen referencias bibliográficas que muestran los fundamentos del proceso de separación y algunos criterios básicos para el diseño de estos recipientes; así mismo, artículos de revistas especializadas han detallado la metodología de diseño de los principales separadores encontrados en la industria. En este sentido podemos mencionar dos antecedentes que por presentar metodologías de diseño de ejecución sencilla para una gran variedad de separadores bifásicos y trifásicos, fueron fundamentales para la elaboración de este trabajo especial de grado.

Svrcek y Monnery (1993) exponen las bases del diseño de los separadores bifásicos líquido-vapor y describen paso a paso el procedimiento involucrado en el cálculo de estos recipientes acotando algunos límites que deben tenerse en cuenta durante el

cálculo de algunos parámetros. Estos autores enfocan el diseño de los separadores con disposición vertical en base a la velocidad crítica que debe tener el vapor para que no ocurra arrastre de gotas en la superficie del líquido, este parámetro es obtenido mediante la ecuación de Sauters-Brown y afecta directamente el valor requerido para el diámetro del separador y la altura asociada a la fase gas; otro parámetro tomado en cuenta es el tiempo de retención de la fase líquida, la cual determinará la altura requerida para almacenar dicha fase. En el caso de los separadores horizontales además de tener en cuenta la velocidad crítica del vapor, también se toma en consideración el tiempo necesario para que ocurra la separación de las gotas de líquido fuera de la fase vapor, este parámetro determinará la longitud mínima del recipiente.

Monnery y Svrcek (1994) publican una estrategia de cálculo para el diseño de separadores trifásicos líquido-líquido-vapor, solventando así la poca información que se tenía sobre este tema, ya que la mayoría de la documentación técnica se encontraba en las guías de diseño de ingeniería de algunas empresas. En este artículo se dan las bases de diseño para los separadores trifásicos, y se describe paso a paso el procedimiento de cálculo tomando en cuenta los límites de algunos parámetros y las suposiciones necesarias para la obtención de los resultados. Los autores enfocan la separación trifásica en base a la ecuación de Sauters-Brown para determinar la separación entre la fase líquida liviana y la fase gas, y en base a la ley de Stokes para determinar la separación entre la fase líquida liviana y la fase líquida pesada. Los parámetros determinantes en el dimensionamiento de estos tipos de separadores son la velocidad crítica de gas, el tiempo de separación de la fase líquida pesada fuera de la fase líquida liviana, el tiempo de separación de la fase líquida liviana fuera de la fase líquida pesada y el tiempo de residencia tanto de la fase líquida liviana como de la fase líquida pesada. Para que ocurra una buena separación los tiempos de residencia deben ser superiores a los tiempos de separación. En este reporte se explica el diseño de separadores verticales y horizontales con bota, con placa deflectora y sin placa ni bota, siendo tomados en cuenta en este trabajo de grado el diseño de los

separadores horizontales con bota y los separadores horizontales con placa deflectora ya que son los más comunes en la industria.

Sin embargo otros antecedentes de gran importancia, los cuales fueron utilizados como referencia por los autores mencionados anteriormente son:

Watkins (1967) publica una metodología para el diseño de separadores líquido-vapor horizontales y verticales, mostrando algunos criterios de diseño en cuanto a la disposición geométrica del recipiente de acuerdo a la carga líquida alimentada, así como relaciones de L/D recomendadas y tiempos de retención comúnmente utilizados cuando se toma en cuenta el intervalo que tarda un operador en reaccionar ante una variación del proceso. Este autor expone que a medida que disminuye el diámetro de un separador, también disminuye el espesor del recipiente y aumenta la altura del mismo, pudiéndose ubicar un punto óptimo para la relación L/D en el rango de 3 a 5, que genere el menor peso del equipo, y por lo tanto la mejor opción de tamaño en cuanto a los costos asociados.

Gerunda (1981) presenta una guía de procedimientos prácticos para el diseño de separadores líquido-vapor horizontales y verticales, dentro de los cuales expone una serie de criterios o especificaciones estándares para el dimensionamiento de estos equipos incluyendo las variaciones en cuanto a la velocidad crítica de vapor que se deben tomar en cuenta con el uso adicional de mallas eliminadoras de niebla, y las variaciones en los rangos de L/D recomendados según la presión de operación del equipo.

I.3.- Objetivos

En función de la información presentada, se establecen los siguientes objetivos:

I.3.1.- General

Elaborar una herramienta de cálculo, soportada en Microsoft Office Excel 2003 ®, para el diseño de separadores bifásicos y trifásicos, horizontales y verticales, basada

en la implementación de hojas de cálculo, incorporando la aplicación de subrutinas mediante la programación en el lenguaje Microsoft Visual Basic for Applications ®, y utilizar esta herramienta en el diseño básico de los separadores de producción y el depurador de gas requeridos en el proyecto de la estación de flujo VK-3 solicitada por la empresa MORIFUELS S.A.

I.3.2.- Específicos

- ▲ Desarrollar una metodología de cálculo para el dimensionamiento de Separadores Bifásicos y Trifásicos, Horizontales y Verticales.
- ▲ Elaborar un compendio de hojas de cálculo en Microsoft Office Excel 2003 ®, mediante la implementación subrutinas programadas bajo el lenguaje Microsoft Visual Basic for Applications ®.
- ▲ Elaborar un manual para el uso y comprensión de las hojas de cálculo, en el cual aparezca la metodología de cálculo implementada, así como los límites y suposiciones que fueron aplicadas.
- ▲ Validar las hojas de cálculo mediante el dimensionamiento de los Separadores de Producción, y el Depurador de Gas presentes en la estación de flujo VK-3.

CAPÍTULO II: Marco Teórico

En este capítulo se establecen las bases teóricas necesarias para alcanzar los objetivos planteados.

II.1.- Fundamentos teóricos de la separación de fases

Un separador es un recipiente utilizado para separar una corriente multifásica en una corriente de fase gaseosa y una o más corrientes de fase líquida (caso de mezclas líquidas inmiscibles), relativamente libres de las otras fases (GPSA, 1998).

En el diseño de separadores es necesario tomar en cuenta los diferentes estados en que pueden encontrarse los fluidos y el efecto que sobre éstos puedan tener las diferentes fuerzas o principios físicos.

II.1.1.- Principios físicos de la separación

Los principios fundamentalmente considerados para realizar la separación física de vapor, líquidos o sólidos son: el momentum o cantidad de movimiento, la fuerza de gravedad y la coalescencia.

a) Cantidad de Movimiento o Momentum: un cambio brusco de dirección de un fluido multifásico ocasiona una variación en el momentum o la velocidad adquirida por las diferentes fase, originando que las partículas de la fase más liviana se muevan y asuman el cambio de dirección mas rápido que las de la fase pesada, generando así la separación (GPSA, 1998; PDVSA, 1995; Bradley, 1987).

b) Fuerza de Gravedad: en el momento en que la fuerza de gravedad que actúa sobre una gota de líquido sea mayor que la fuerza de arrastre que ejerce el flujo de gas sobre la misma gota, esta se separará de la fase gaseosa (GPSA, 1998; PDVSA, 1995).

c) Coalescencia: las gotas muy pequeñas no pueden ser separadas por gravedad. Estas gotas al unirse entre ellas por el fenómeno de coalescencia, logran formar gotas

más grandes las cuales, pueden ser separadas por gravedad (GPSA, 1998; PDVSA, 1995).

Toda separación puede emplear uno o más de estos principios, pero siempre las fases de los fluidos deben ser inmiscibles y de diferentes densidades para que ocurra la separación, ya que de lo contrario se requerirá aplicar otros mecanismos de separación que no entran en el contexto de esta investigación (GPSA, 1998).

II.1.2.- Velocidad Crítica

En el dimensionamiento de separadores para lograr una separación por gravedad se debe buscar una velocidad crítica o velocidad de libre asentamiento, determinada como la velocidad de vapor calculada empíricamente que se utiliza para asegurar que la velocidad superficial del vapor a través del separador, sea lo suficientemente baja para prevenir un arrastre excesivo de líquido (PDVSA, 1995). Este parámetro describe las fuerzas de gravedad y de arrastre por vapor que se ejercen en la partícula o gota de líquido, siendo función del coeficiente de arrastre el cual es a su vez una función del tamaño de la partícula de líquido y del número de Reynolds asociado a la corriente de gas. Este valor puede ser determinado mediante el uso de dos modelos físicos: la Ley de Newton y la Ley de Stokes.

a) Ley de Newton: el coeficiente de arrastre presenta un valor límite a altos números de Reynolds (entre 500 y 200000). A esta condición de régimen de flujo y para partículas de líquido relativamente grandes (aproximadamente 1000 micrones o mayores) el asentamiento debido a la fuerza de gravedad es descrito mediante la Ley de Newton, dando como resultado un modelo matemático para la velocidad crítica (GPSA,1998), según:

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

b) Ley de Stokes: a bajos números de Reynolds (entre 0,0001 y 2) y tamaños de partículas de líquido pequeñas (entre 5 y 100 micrones de diámetro), el coeficiente de

arrastre es linealmente dependiente del número de Reynolds (GPSA, 1998). A estas condiciones la velocidad crítica puede ser expresada mediante la Ley de Stokes de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$V_t = \frac{1,488 \cdot g \cdot D_p^2 \cdot (\rho_L - \rho_G)}{18 \cdot \mu} \quad (\text{Ec. 2})$$

Es por esto que la velocidad crítica depende del tipo de flujo multifásico a tratar, así como la operación a la cual será sometido. Sin embargo existen criterios prácticos con los cuales se puede tener una buena aproximación de este valor.

En el presente estudio se determinará para la separación líquido-vapor, la velocidad crítica o velocidad de asentamiento del gas mediante la ecuación de Souders-Brown, la cual está basada en el principio del tamaño mínimo que debe tener una partícula o gota de líquido para que pueda asentarse o decantar en una corriente de gas que se mueve a una velocidad determinada (API, 1989). Esta velocidad puede ser determinada mediante la siguiente ecuación:

$$U_c = K \cdot \sqrt{\frac{(\rho_L - \rho_G)}{\rho_G}} \quad (\text{Ec. 3})$$

La constante de velocidad crítica, también conocida como coeficiente de Souders-Brown o factor K, es un parámetro que depende del tamaño de partícula o gota de líquido y del coeficiente de arrastre que ejercerá el gas en dicha partícula (Svrcek y Monnery, 1993). Esta constante puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$K = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot D_p}{3 \cdot C_D}} \quad (\text{Ec. 4})$$

En la mayoría de los casos de separación donde el tamaño de partícula o gota es lo suficientemente grande para precipitar solo por acción de la fuerza de gravedad evitando así el uso de eliminadores de niebla, se puede utilizar la ecuación de la constante de velocidad crítica citada anteriormente, para esto se requiere conocer el

tamaño de gota, obtenido mediante pruebas de laboratorio, y el coeficiente de arrastre el cual puede ser calculado experimentalmente mediante la siguiente ecuación (Svrcek y Monnery, 1993):

$$C_D = \exp(Y) \quad (\text{Ec. 5})$$

$$Y = 8,411 - 2,243 \cdot X + 0,273 \cdot X^2 - 1,865 \cdot 10^{-2} \cdot X^3 + 5,201 \cdot 10^{-4} \cdot X^4 \quad (\text{Ec. 6})$$

$$X = \text{Ln} \left(\frac{0,95 \cdot 10^8 \cdot \rho_G \cdot D_P^3 \cdot (\rho_L - \rho_G)}{\mu_G^2} \right) \quad (\text{Ec. 7})$$

Si las partículas de líquido a ser separadas de la corriente de gas son muy pequeñas, es necesario hacer uso de eliminadores de niebla para provocar la coalescencia entre las gotas aumentando su tamaño y promoviendo así su precipitación por gravedad. En este caso el valor de la constante de velocidad crítica, K, es determinado empíricamente debido a que el diámetro originado por la coalescencia entre las partículas no se puede predecir adecuadamente. Para este estudio se utilizaron las ecuaciones reportadas en el documento técnico realizado por Otto H. York Company Inc. (York, 1993), las cuales dependen de la presión de operación del separador. Estas ecuaciones son:

$$1 \leq P(\text{psia}) < 15 \quad K = 0,1821 + 0,0029 \cdot P + 0,0460 \cdot \text{Ln}(P) \quad (\text{Ec. 8})$$

$$15 \leq P(\text{psia}) < 40 \quad K = 0,35 \quad (\text{Ec. 9})$$

$$40 \leq P(\text{psia}) \leq 5500 \quad K = 0,430 - 0,023 \cdot \text{Ln}(P) \quad (\text{Ec. 10})$$

En el caso de una separación entre dos fases líquidas también se debe calcular una velocidad de asentamiento o velocidad de separación, la cual es determinada a partir de la ley de Stokes (Monnery y Svrcek, 1994), tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$U_A = \frac{K_S \cdot (\rho_{Lh} - \rho_{Ll})}{\mu} \quad (\text{Ec. 11})$$

La constante de la velocidad crítica para la Ley de Stokes depende del valor mínimo de diámetro de gota entre ambos fluidos (Monnery y Svrcek, 1994), y puede ser obtenida a partir de la siguiente ecuación:

$$K_s = 2,06151 \cdot 10^{-5} \cdot D_p^2 \quad (\text{Ec. 12})$$

II.2.- Etapas de la Separación de Fases

En el caso de mezclas líquido-vapor, la mezcla de fases entra al separador y, si existe, choca contra un aditamento interno ubicado en la entrada, bien sea una placa, un cilindro o un codo, lo cual hace que cambie el momentum de la mezcla, provocando así una separación gruesa de las fases. Seguidamente, en la sección de decantación (espacio libre) del separador, actúa la fuerza de gravedad sobre el fluido permitiendo que el líquido abandone la fase vapor y descienda hacia el fondo del separador, y que las burbujas de vapor abandonen la fase líquida (sección de acumulación de líquido). Esta sección provee del tiempo de retención suficiente para que los equipos aguas abajo pueden operar satisfactoriamente y, si se ha tomado la previsión correspondiente, liberar el líquido de las burbujas de gas atrapadas.

En el caso de separaciones que incluyan dos fases líquidas, se necesita tener un tiempo de residencia adicional, dentro del tambor, lo suficientemente alto para la decantación de una fase líquida pesada, y la “flotación” de una fase líquida liviana (PDVSA, 1995).

Normalmente, pueden identificarse cuatro zonas principales en los separadores, tal como se muestra en la figura 1 (Ver pág. 12).

a) Separación primaria: El cambio en la cantidad de movimiento de las fases a la entrada del separador genera la separación gruesa de las fases. Esta zona incluye las boquillas de entrada y los aditamentos de entrada, tales como deflectores ó distribuidores (GPSA, 1998).

b) Separación secundaria: Durante la separación secundaria se observan zonas de fase continua con gotas dispersas (fase discontinua), sobre la cual actúa la fuerza de gravedad (GPSA, 1998). Esta fuerza se encarga de decantar hasta cierto tamaño de gotas de la fase pesada discontinua en la fase liviana continua. También produce la separación de hasta un cierto tamaño de gotas de la fase líquida discontinua, en la fase líquida continua. En esta parte del recipiente la fase liviana se mueve a una velocidad relativamente baja y con muy poca turbulencia (PDVSA, 1995).

c) Separación por coalescencia: En ciertas situaciones, no es aceptable que gotas muy finas de la fase pesada discontinua sean arrastradas en la fase liviana: por ello es necesario que, por coalescencia, tales gotas finas alcancen un tamaño lo suficientemente grande para separarse por gravedad: para lograrlo se hace necesario tener elementos como los eliminadores de niebla ó Mallas para el caso de separadores líquido-vapor, o las esponjas o platos coalescedores, en el caso de la separación líquido-líquido (PDVSA, 1995).

d) Recolección de las fases líquidas: En esta zona se reciben las fases líquidas que han sido separadas en las zonas anteriores. Estas fases líquidas ya separadas requieren de un volumen de control y emergencia para una operación confiable y segura de los equipos aguas abajo (PDVSA, 1995).

II.3.- Clasificación de los Separadores

Los separadores pueden ser clasificados de acuerdo a muchos parámetros, entre los cuales tenemos principalmente:

a) Según la disposición geométrica: los separadores pueden clasificarse en horizontales, verticales y esféricos. Debido a que las dos primeras disposiciones son las frecuentemente encontradas en la industria, serán las abordadas en este estudio. En la figura 1, se muestra un esquema de estas dos configuraciones (PDVSA, 1995).

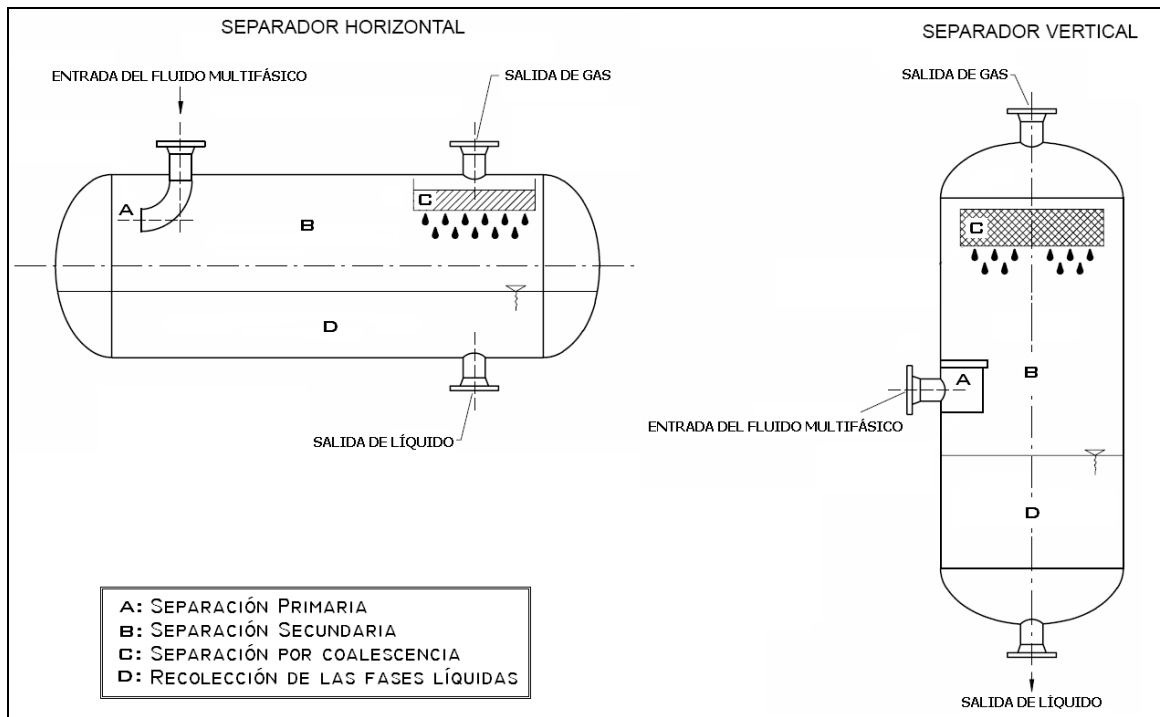


Figura 1. Zonas de separación. (Extraído y Modificado de PDVSA, 1995)

b) Según las fases a ser separadas: generalmente podemos encontrar separadores bifásicos líquido-vapor y líquido-líquido, y separadores trifásicos líquido-líquido-vapor (Bradley, 1987).

c) Según la presión de operación: los separadores comúnmente trabajan en un rango de presión entre 20 y 1500 psi. En este sentido tenemos separadores de baja presión con un rango entre 20 y 250 psi; separadores de presión media con un rango entre 250 y 750 psi; y separadores de alta presión con un rango entre 750 y 1500 psi (Bradley, 1987).

En la figura 2 se muestran los diferentes tipos de separadores que se pueden encontrar dentro de las estaciones de producción superficial, entre los cuales se tienen separadores horizontales, verticales, bifásicos y trifásicos, agrupados según la presión de operación.

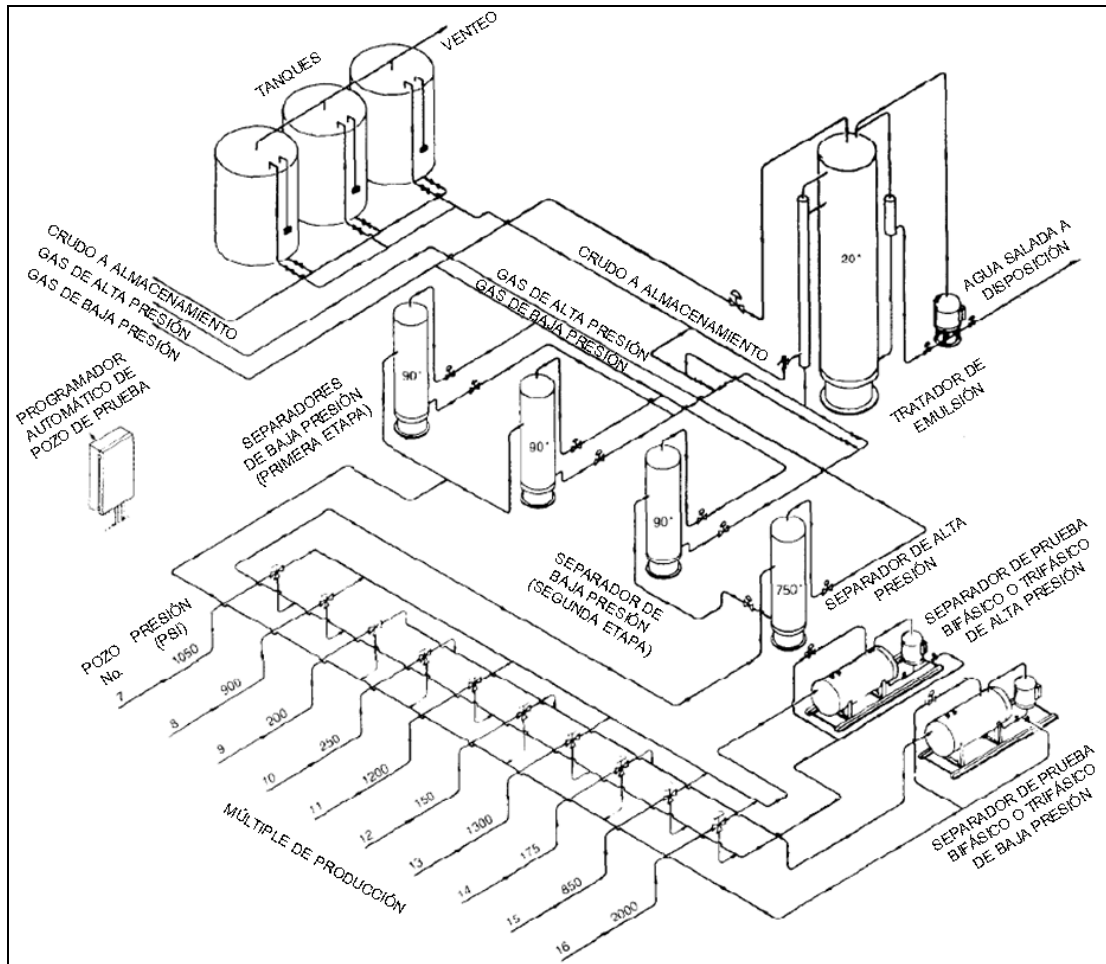


Figura 2. Separadores encontrados en una estación de Producción Superficial. (Extraído de Bradley, 1987)

d) Según el mecanismo utilizado para inducir la separación: pueden clasificarse en separadores por gravedad, separadores por impacto y separadores por fuerza centrífuga (Bradley, 1987).

e) Según su función: los separadores tendrán características puntuales según el uso que estos cumplan dentro del proceso, cambiando desde la configuración hasta los internos del equipo. Dentro de los principales ejemplos encontrados tenemos: Tambores “knockout” (KO), encargados de eliminar el agua de una corriente vapor-crudo-agua, o eliminar todo el líquido de una corriente líquido-vapor; Separadores de Producción y Separadores de Prueba, que son separadores líquido-vapor comúnmente utilizados en las cercanías de un cabezal de pozo o posterior a un múltiple o manifold,

para separar las fases extraídas de la producción de un pozo; Tambor Flash, separador líquido-vapor el cual comúnmente trabaja a bajas presiones y es alimentado por el líquido proveniente de un separador de alta presión; Despojador o Gas Scrubber, similar a un separador líquido-vapor, el cual maneja bajos contenidos de líquido a caudales estables; entre otros (Bradley, 1987).

En este trabajo serán clasificados los separadores en horizontales y verticales, bifásicos y trifásicos, con y sin eliminadores de niebla, y en el caso de los separadores bifásicos verticales se incluye el uso de paquetes de vena, que es otro tipo de eliminador de niebla.

II.3.1.- Separadores Horizontales

En estos equipos, la fase pesada decanta perpendicularmente a la dirección horizontal de flujo de la fase liviana, permitiendo que la fase liviana continua pueda viajar a una velocidad superior a la velocidad de decantación de la fase pesada discontinua (hasta un cierto límite).

La figura 3 ilustra algunos separadores horizontales:



Figura 3. Separadores Horizontales. (Extraído de Amistaco, 2004)

Entre las principales ventajas y desventajas que presenta este tipo de separadores están:

a) Ventajas:

- ▲ Normalmente empleados cuando la relación vapor-líquido es baja.
- ▲ Requieren de poco espacio vertical para su instalación.
- ▲ Por lo general, son más económicos.
- ▲ Requieren menor diámetro que un tambor vertical, para una capacidad dada de gas.
- ▲ Manejan grandes cantidades de líquido, fuertes variaciones en la entrada de líquido, o separación líquido-líquido, optimizando el volumen de operación requerido.
- ▲ Los volúmenes de retención facilitan la desgasificación de líquido y el manejo de espuma, si se forma.

b) Desventajas:

- ▲ Variaciones de nivel de la fase pesada afectan la separación de la fase liviana.
- ▲ Ocupan mucho espacio horizontal.
- ▲ Difícil remoción de sólidos acumulados (Necesidad de inclinar el recipiente o añadir internos como tuberías de lavado)

II.3.2.- Separadores Verticales

En estos equipos, la fase pesada decanta en dirección opuesta al flujo vertical de la fase liviana. Por consiguiente, si la velocidad de flujo de la fase liviana excede levemente la velocidad de decantación de la fase pesada, no se producirá la separación de fases, a menos que esta fase pesada coalesca en una gota más grande.

La figura 4 ilustra algunos separadores verticales encontrados en la industria.



Figura 4. Separadores Verticales. (Extraído de Amistaco, 2004)

Entre las principales ventajas y desventajas del separador vertical están:

a) Ventajas:

- ▲ Normalmente empleados cuando la relación gas o vapor-líquido es alta y/o cuando se esperan grandes variaciones en el flujo de vapor/gas.
- ▲ Mayor facilidad, que un tambor horizontal, para el control del nivel del líquido, y para la instalación física de la instrumentación de control, alarmas e interruptores.
- ▲ Ocupa poco espacio horizontal
- ▲ La capacidad de separación de la fase liviana no se afecta por variaciones en el nivel de la fase pesada.
- ▲ Facilidad en remoción de sólidos acumulados.

b) Desventajas:

- ▲ El manejo de grandes cantidades de líquido, fuertes variaciones en la entrada de líquido, o separación líquido-líquido, obliga a tener excesivos tamaños de recipientes, cuando se selecciona esta configuración.

- ▲ Requieren mayor diámetro que un tambor horizontal para una capacidad dada de gas.
- ▲ Requieren de mucho espacio vertical para su instalación.
- ▲ Fundaciones más costosas cuando se comparan con tambores horizontales equivalentes.
- ▲ Cuando hay formación de espuma, o se quiere desgasificar un líquido ya recolectado, se requieren grandes volúmenes de líquido y, por ende, grandes tamaños del tambor.

II.4. Internos de un Separador

Los internos de un separador prestan una gran variedad de funciones, todas con el objetivo de mejorar la separación de las fases y/o garantizar una operación confiable y segura de los equipos aguas abajo

II.4.1 Deflectores

Las placas de choque son ampliamente utilizadas en la entrada del separador para efectuar la separación primaria; la corriente entrante de fluido choca con la superficie de la placa donde algunas pequeñas gotas de líquido se aglomeran y descienden como gotas más grandes.

II.4.2 Schoepentoeter

Es un dispositivo interno tipo aleta comúnmente utilizado para introducir una mezcla líquido-vapor al separador, teniendo como propósito disminuir el momentum de la corriente de alimentación (figura 5), promoviendo una etapa de separación inicial y distribuyendo el gas en toda la sección transversal del separador.

II.4.3 Eliminadores de Niebla

La función del extractor de niebla es remover las partículas o gotas de líquido que sean muy finas y que se encuentren contenidas en la fase gaseosa, antes que esta abandone el separador.

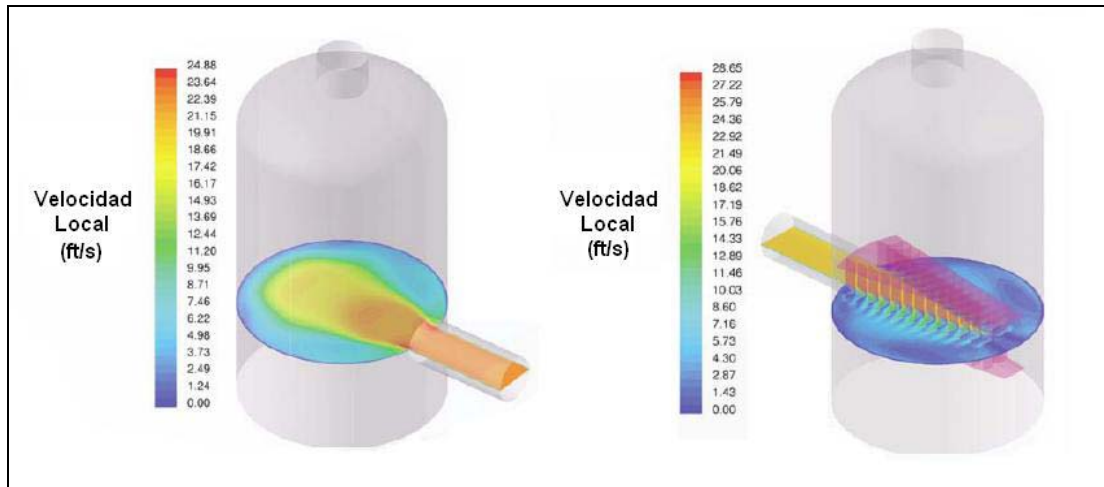


Figura 5. Distribución de la velocidad de entrada con una boquilla normal y un Schoepentoeter. (Extraído y modificado de Otto York, 2007)

Los dos principales extractores de niebla disponibles actualmente son:

a) Malla de alambre eliminadora de Niebla: está hecha de una fina malla tejida de acero inoxidable dispuesta en un cilindro ajustado de aproximadamente 6 (in) de espesor (figura 6). Las gotas de líquido que no se han separado por gravedad, coalescen con la malla y entre ellas mismas separándose del gas. Teniendo una velocidad del gas adecuadamente baja, se puede separar hasta un 99% de las gotas con tamaños superiores a los 10 micrones. Sin embargo, ciertos tipos de fluidos podrían tapar este tipo de extractor, en estos casos es recomendable utilizar un extractor de niebla tipo aleta (Abdel-Aal, Aggour y Fahim, 2003)

b) Extractor de niebla tipo aleta: Consiste en un conjunto de platos corrugados ubicados en forma paralela con una estrecha separación entre ellos (figura 7), promoviendo la separación entre las finas gotas de líquido y el gas por medio del cambio de dirección, ocasionando la coalescencia de las gotas con las paredes corrugadas de los platos, los cuales van frenado las gotas hasta que las mismas decantan en una zona de recolección (Abdel-Aal, Aggour y Fahim, 2003; Bradley, 1987).



Figura 6. Eliminadores de niebla tipo malla. (Extraído de Otto York, 2007)



Figura 7. Eliminadores de niebla tipo aleta. (Extraído de Otto York, 2007)

II.5. Parámetros Involucrados en el Dimensionamiento de Separadores

Existen parámetros que deben tomarse en cuenta a la hora de diseñar un separador para una aplicación en particular:

a) Factor de carga máximo permisible (λ_{Gmax}): este parámetro está definido como la velocidad máxima de vapor en la superficie del paquete de aletas al ser corregida por la densidades de las fases. Existen dos maneras de calcular dicho parámetro dependiendo de cual sea el Número de Arquímedes (Ar) asociado a las fases a ser separadas. En tal sentido para $Ar > 225$, el factor de carga puede ser determinado mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda_{Gmax} = \frac{1,75 \cdot \left(\frac{32,187 \cdot 1000 \cdot \sigma \cdot 2,2046E^{-3}}{\rho_L - \rho_G} \right)^{0,24} \cdot \left(\frac{100 \cdot \sigma}{30,48 \cdot \mu_L} \right)^{0,04}}{1 + 25 \cdot \theta_v} \quad (\text{Ec. 13})$$

Por el contrario para $Ar \leq 225$, el factor de carga vendrá determinado mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda_{Gmax} = \frac{0,14 \cdot \left(\frac{100 \cdot \sigma}{30,48 \cdot \mu_L} \right)}{1 + 25 \cdot \theta_v} \quad (\text{Ec. 14})$$

El primer caso es el más común, dándose el segundo solo cuando la densidad del líquido es relativamente alta.

b) Flujo volumétrico de vapor máximo manejable (Q^*_{max}): parámetro designado en el diseño de separadores verticales con dispositivos de aleta, el cual no es más que una corrección del flujo volumétrico del vapor con las densidades de ambas fases agregando un factor de sobrediseño. Este puede ser calculado mediante la siguiente ecuación:

$$Q^*_{max} = \left(1 + \frac{\% \text{Diseño}}{100} \right) \cdot Q_{GA} \cdot \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G}} \quad (\text{Ec. 15})$$

c) Número de Arquímedes (Ar): es un número adimensional, definido como la relación entre la fuerza gravitacional y la fuerza viscosa con la cual se caracteriza el movimiento de fluidos con diferentes densidades. Este parámetro puede ser determinado mediante la siguiente ecuación:

$$Ar = \left(\frac{45.359 \cdot \rho_L}{\mu_L^2} \right) \cdot \sqrt{\frac{\sigma^3}{32,187 \cdot 453,592 \cdot (\rho_L - \rho_G)}} \quad (\text{Ec. 16})$$

d) Parámetro de flujo (θ_{feed}): utilizado para caracterizar el tipo de alimentación gas-líquido que entra al separador. Este parámetro puede ser determinado mediante la siguiente ecuación:

$$\theta_{feed} = \frac{Q_L}{Q_{GA}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_G}} \quad (\text{Ec. 17})$$

Si el parámetro de flujo es menor a 0,01, no se esperará oleaje a la entrada del separador.

e) Tiempo de Holdup (t_H): es el tiempo que tarda en vaciarse el separador desde el nivel normal de líquido (NNL) hasta el nivel bajo de líquido (NBL), mientras se mantiene una descarga normal del líquido y se elimina la entrada de alimentación. Este tiempo está basado en el volumen de líquido requerido para mantener un buen control de operación y garantizar la seguridad de los equipos aguas abajo (Svrcek and Monnery, 1993). Por lo general este parámetro está tabulado según el tipo de operación, permitiendo calcular el volumen de líquido requerido o volumen de Holdup V_H , mediante la siguiente ecuación:

$$V_H = t_H \cdot Q_L \cdot 60 \quad (\text{Ec. 18})$$

f) Tiempo de Residencia (θ_{LL} y θ_{LH}): parámetro asignado a la separación entre fases líquidas, y considerado como el tiempo requerido para que el flujo de la fase continua pueda atravesar la longitud del separador (caso de separadores horizontales)

(Monnery and Svrcek, 1994). Este parámetro está determinado por las siguientes ecuaciones:

$$\theta_{LL} = \frac{A_{LL} \cdot L}{Q_{LL}} \quad (\text{Ec. 19})$$

$$\theta_{LH} = \frac{A_{LH} \cdot L}{Q_{LH}} \quad (\text{Ec. 20})$$

g) Tiempo de Surge (t_s): es el tiempo que tarda el nivel de líquido en aumentar desde el nivel normal de líquido (NNL) hasta el nivel alto de líquido (NAL), mientras se mantiene una alimentación normal y se eliminan las salidas de flujo. Este tiempo es usualmente basado en requerimientos de acumulación de líquido como resultado de una variación o desperfecto aguas arriba o aguas abajo del proceso. Al igual que el tiempo de Holdup, hay valores tabulados para este parámetro dependiendo del tipo de operación, sin embargo, en ausencia de un requerimiento en específico, este tiempo puede ser tomado como la mitad del tiempo de Holdup (Svrcek and Monnery, 1993). A partir de este parámetro se puede calcular el volumen de Surge V_s , necesario para prevenir alguna fluctuación, mediante la ecuación:

$$V_s = t_s \cdot Q_L \cdot 60 \quad (\text{Ec. 21})$$

h) Tiempo de Separación: es el tiempo requerido para que precipiten o floten las gotas de la fase discontinua fuera de la fase continua (Monnery and Svrcek, 1994). En el caso de la separación líquido-vapor, el tiempo de decantación de las gotas de líquido fuera de la fase vapor ϕ , viene determinado mediante la siguiente ecuación:

$$\phi = \frac{H_G}{U_G} \quad (\text{Ec. 22})$$

En el caso de una separación líquido-líquido el tiempo de decantación o flotación de la fase discontinua (pesada o liviana según sea el caso) fuera de la fase continua t_{LL} y t_{LH} , vendrá determinada por las velocidades de separación (calculadas mediante la

ecuación 11) y las distancias horizontales a recorrer para lograr dicha separación, tal como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$t_{LL} = \frac{12 \cdot H_{LH}}{U_{LL}} \quad (\text{Ec. 23})$$

$$t_{LH} = \frac{12 \cdot H_{LL}}{U_{LH}} \quad (\text{Ec. 24})$$

II.6. Correlaciones para el Dimensionamiento de Separadores

Para determinar el dimensionamiento de los separadores se utilizan las correlaciones planteadas en la tabla 1, tanto en el cálculo del diámetro, como en longitud del separador (Svrcek and Monnery, 1993; Monnery and Svrcek, 1994):

Tabla 1. Correlaciones para las principales dimensiones de separadores.

Correlación para el Diámetro del Separador (D)	Correlación para la Altura o Longitud del Separador (L)
Separador Bifásico Vertical (Líquido-Vapor) sin Extractor de Niebla:	
$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{ga}}{\pi \cdot U_G}} \quad (\text{Ec. 25})$	$H = H_{NBL} + H_H + H_S + H_{LIN} + H_D \quad (\text{Ec. 26})$
Separador Bifásico Vertical (Líquido-Vapor) con Malla Extractora de Niebla:	
$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{ga}}{\pi \cdot U_G}} \quad (\text{Ec. 25})$	$H = H_{NBL} + H_H + H_S + H_{LIN} + H_D + H_{ME} \quad (\text{Ec. 27})$
Separador Bifásico Vertical (Líquido-Vapor) con Paquete de Aleta en 1 Etapa:	
<p>▲ <i>Criterio para la distribución del flujo en la cara de la vena:</i></p> $D \geq 0,656 + \sqrt{(W_{vb}^2 + t_{vb}^2)} \quad (\text{Ec. 28})$ <p>▲ <i>Criterio de Accesibilidad:</i></p> $D \geq 1,97 \quad (\text{Ec. 29})$	$H = H_L + X_1 + H_{vb} + X_2 \quad (\text{Ec. 30})$

Separador Bifásico Vertical (Líquido-Vapor) con Paquete de Aleta en 2 Etapas:	
<p>▲ <i>Criterio de Separación Primaria:</i></p> $D \geq 1,13 \cdot \sqrt{\frac{Q_{máx}^*}{\lambda_{máx}}} \quad (\text{Ec. 31})$ <p>▲ <i>Criterio de Desgasificación:</i></p> $D \geq 7608 \cdot \sqrt{\frac{Q_L \cdot \mu_L}{526119 \cdot (\rho_L - \rho_G)}} \quad (\text{Ec. 32})$ <p>▲ <i>Criterio de De-foaming:</i></p> $D \geq 95 \cdot \frac{Q_L^{0,5}}{5,94} \cdot \left(\frac{\mu_L}{1,49E^4 \cdot (\rho_L - \rho_G)} \right)^{0,14} \quad (\text{Ec. 33})$ <p>▲ <i>Criterio para la distribución del flujo en la cara de la vena:</i></p> $D \geq \frac{\left(2 \cdot \left(t_{vb} + \sqrt{t_{vb}^2 + 0,6 \cdot \pi \cdot A_v} \right) \right)}{\pi} \quad (\text{Ec. 34})$ <p>▲ <i>Criterio de Accesibilidad:</i></p> $D \geq 1,97 \quad (\text{Ec. 29})$	$H = H_L + Y_1 + H_P + Y_2 + H_{vb} + Y_3 \quad (\text{Ec. 35})$
Separador Bifásico Horizontal (Líquido-Vapor) sin Extractor de Niebla:	
$D = \left(\frac{4 \cdot (V_H + V_S)}{\pi \cdot 0,6 \cdot \left(\frac{L}{D} \right)_A} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Ec. 36})$	$L = \frac{V_H + V_S}{A_T - A_G - A_{NBL}} \quad (\text{Ec. 37})$ $L_{MIN} = U_{GA} \cdot \phi \quad (\text{Ec. 38})$ <p>Siendo: $L \geq L_{MIN} \quad (\text{Ec. 39})$</p>
Separador Bifásico Horizontal (Líquido-Vapor) con Malla Extractora de Niebla:	
$D = \left(\frac{4 \cdot (V_H + V_S)}{\pi \cdot 0,6 \cdot \left(\frac{L}{D} \right)_A} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Ec. 36})$	$L = \frac{V_H + V_S}{A_T - A_G - A_{NBL}} \quad (\text{Ec. 37})$ $L_{MIN} = U_{GA} \cdot \phi \quad (\text{Ec. 38})$ <p>Siendo: $L \geq L_{MIN} \quad (\text{Ec. 39})$</p>

Separador Bifásico Horizontal (Líquido-Líquido):	
$D = 2,3 \cdot \sqrt{\frac{(Q_{Ll}^2 + Q_{Lh}^2)}{(Q_{Ll} \cdot \frac{U_{Ll}}{60} + Q_{Lh} \cdot \frac{U_{Lh}}{60})}} \quad (\text{Ec. 40})$	$L = \left(\frac{L}{D}\right)_A \cdot D \quad (\text{Ec. 41})$
Separador Trifásico Horizontal (Líquido-Líquido-Vapor) con Placa:	
$D = \left(\frac{16 \cdot (V_H + V_S)}{\pi \cdot 0,6 \cdot \left(\frac{L}{D}\right)_A}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Ec. 42})$	<p>Valor máximo entre:</p> $L_2 = \frac{V_H + V_S}{A_T - A_G - A_{NBL}} \quad (\text{Ec. 43})$ $L_2 = \frac{d_{Ll}}{12} + 1 \quad (\text{Ec. 44})$ <p>Valor máximo entre:</p> $L_1 = \frac{t_{Ll} \cdot Q_{Ll} \cdot 60}{A_{Ll}} \quad (\text{Ec. 45})$ $L_1 = \frac{t_{Lh} \cdot Q_{Lh} \cdot 60}{A_{Lh}} \quad (\text{Ec. 46})$ <p>Siendo:</p> $L = L_1 + L_2 \quad (\text{Ec. 47})$
Separador Trifásico Horizontal (Líquido-Líquido-Vapor) con Bota:	
$D = \left(\frac{4 \cdot (V_H + V_S)}{\pi \cdot 0,6 \cdot \left(\frac{L}{D}\right)_A}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Ec. 36})$	$L = \frac{V_H + V_S}{A_T - A_G - A_{LIS}} \quad (\text{Ec. 48})$ $L_{MIN} = U_{GA} \cdot \phi \quad (\text{Ec. 38})$ <p>Siendo:</p> $L \geq L_{MIN} \quad (\text{Ec. 39})$ <p>Si $\theta_{LL} < t_{LH}$, entonces:</p> $L = \frac{t_{Lh} \cdot Q_{Ll}}{(A_T - A_G)} \quad (\text{Ec. 49})$

CAPÍTULO III: Metodología

En el presente capítulo se explican cada una de las metodologías llevadas a cabo para el desarrollo de las hojas de cálculo de los diferentes tipos de separadores contemplados en el presente trabajo especial de grado, y los pasos a seguir para comprobar el funcionamiento de dicha herramienta de cálculo. Este capítulo estará dividido de acuerdo a la metodología reportada en los trabajos de Svrcek y Monnery (1993 y 1994), así como otros documentos técnicos especializados, bajo la clasificación que se muestra a continuación:

- ▲ Separador Vertical Líquido-Vapor sin Extractor de Niebla
- ▲ Separador Vertical Líquido-Vapor con Extractor de Niebla
- ▲ Separador Vertical Líquido-Vapor con Paquete de Aletas en 1 Etapa
- ▲ Separador Vertical Líquido-Vapor con Paquete de Aletas en 2 Etapas
- ▲ Separador Horizontal Líquido-Vapor sin Extractor de Niebla
- ▲ Separador Horizontal Líquido-Vapor con Extractor de Niebla
- ▲ Separador Horizontal Líquido-Líquido
- ▲ Separador Horizontal Líquido-Líquido-Vapor con Placa de Rebose
- ▲ Separador Horizontal Líquido-Líquido-Vapor con Bota

III.1.- Separador Vertical Líquido-Vapor sin Extractor de Niebla

En esta sección se citan las bases de diseño y el procedimiento de cálculo vinculado con el dimensionamiento de separadores verticales líquido-vapor sin el uso de extractores de niebla.

III.1.1.- Bases de Diseño

Las bases de diseño que fueron seleccionadas para el dimensionamiento de este tipo de separador se mencionan a continuación:

- ▲ El diámetro de partícula D_P por defecto es tomado como 150 *micrones*.

- ▲ La velocidad de la fase vapor U_G , debe ser un valor comprendido entre el 75% y el 100% de la velocidad crítica de dicha fase U_C .
- ▲ El diámetro comercial del separador D , debe ir de medio pie en medio pie.
- ▲ El nivel de líquido o altura mínima que debe tener la zona de almacenamiento o Holdup H_H , es de 1 *ft*.
- ▲ El nivel de líquido o altura mínima que debe tener la zona de fluctuación por oleaje o Surge H_S , es de 0,5 *ft* o 6 *in*.
- ▲ La selección de la altura del “Nivel Bajo de Líquido” (H_{NBL}) está dada por las siguientes relaciones:
 - ✓ Para una presión de operación menor a 300 *psia* y un diámetro del separador menor a 10 *ft*, el valor de H_{NBL} debe ser de 1,25 *ft*.
 - ✓ Para una presión de operación menor a 300 *psia* y un diámetro del separador mayor o igual a 10 *ft*, el valor de H_{NBL} debe ser de 0,5 *ft*.
 - ✓ Para una presión de operación mayor o igual a 300 *psia*, sea cual sea el tamaño del diámetro del separador, el valor de H_{NBL} debe de ser de 0,5 *ft*.
- ▲ La relación Altura-Diámetro del separador L/D , debe estar entre 1,5 y 5.

III.1.2.- Procedimiento de cálculo

El procedimiento de diseño utilizado para la elaboración de la hoja de cálculo para este tipo de separador incluye los pasos mencionados a continuación:

Paso 1.- Introducción de los datos mínimos requeridos para llevar a cabo los cálculos del dimensionamiento del separador.

Es requerido conocer algunos datos sobre la operación del separador y las condiciones de las fases involucradas, tales como:

- ▲ Presión de operación P , la cual es requerida en la unidad *psig*. El programa posteriormente realiza el cambio a la unidad *psia* mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$P(\text{psia}) = P(\text{psig}) + 14,7 \quad (\text{Ec. 50})$$

- ▲ Temperatura de operación **T**, la cual es requerida en la unidad °F. El programa posteriormente realiza el cambio a la unidad °R mediante la siguiente ecuación:

$$T(^{\circ}R) = T(^{\circ}F) + 460 \quad (\text{Ec. 51})$$

- ▲ Diámetro de partícula o gota de líquido en el gas **D_P**, en *micrones*.
- ▲ Tiempo de almacenamiento o Holdup **t_H**, en minutos (*min*).
- ▲ Tiempo de fluctuación por oleaje o Surge **t_S**, en minutos (*min*).

En el caso particular de la fase vapor se incluyeron los siguientes datos:

- ▲ Flujo volumétrico en condiciones estándares **Q_{GS}**, en millones de pies cúbicos estándares por día (*MMSCFD*).
- ▲ Peso molecular de la fase **PM**, en *lb/lb-mol*.
- ▲ Factor de compresibilidad **Z**.
- ▲ Viscosidad de la fase **μ_G**, en *cP*.

Por otro lado, para el caso de la fase líquida se incluyeron los siguientes datos:

- ▲ Flujo volumétrico **Q_L**, en barriles por día (*BPD*). Posteriormente el programa realiza el cambio a *ft³/s* mediante la siguiente ecuación:

$$Q_L \left(\frac{ft^3}{s} \right) = \frac{Q_L(BPD) \cdot 42 \cdot 0,13368}{24 \cdot 3600} \quad (\text{Ec. 52})$$

- ▲ Algunos de los siguientes datos de relación directa con la densidad **ρ_L**:
 - ✓ Densidad **ρ_L**, en *lb/ft³*.
 - ✓ Gravedad API (*°API*). Para lo cual el programa realiza el cambio a *lb/ft³* mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_L \left(\frac{lb}{ft^3} \right) = 62,43 \cdot \left(\frac{141,5}{^{\circ}API + 131,5} \right) \quad (\text{Ec. 53})$$

- ✓ Gravedad específica (s.g.). Para lo cual el programa realiza el cambio a lb/ft^3 mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_L \left(\frac{lb}{ft^3} \right) = sg \cdot 62,43 \quad (\text{Ec. 54})$$

Paso 2.- Determinación de la densidad de la fase gas.

La densidad de la fase gas se determinó a través de la ecuación de los gases reales tal como se muestra en la ecuación 55.

$$\rho_G = \frac{P \cdot PM}{z \cdot 10,73 \cdot T} \quad (\text{Ec. 55})$$

Paso 3.- Determinación del flujo volumétrico de vapor a las condiciones actuales.

Los cálculos de diseño tuvieron que ser realizados a las condiciones de operación del separador, para lo cual se llevó el flujo volumétrico del gas de las condiciones estándares a las condiciones actuales mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{GA} = \frac{Q_{GS} \cdot 10^{+6} \cdot PM}{379,49 \cdot 86400 \cdot \rho_G} \quad (\text{Ec. 56})$$

Paso 4.- Determinación de la velocidad de vapor a partir de su velocidad crítica.

La velocidad crítica U_C , se determinó mediante la ecuación 3, haciendo uso del modelo teórico de K , determinado a su vez por la ecuación 4. Para dicho modelo se requirió calcular el valor del coeficiente de arrastre C_D , mediante las ecuaciones 5, 6 y 7, conociendo el valor del diámetro de gota D_P , y llevándolo de micrones a pies al multiplicarlo por $3,28084 \cdot 10^{-6}$.

El valor de la velocidad de vapor U_G , tomado por el programa, fue igual al 100% de la velocidad crítica U_C (este porcentaje puede ser modificado por el usuario).

Paso 5.- Determinación del diámetro del recipiente.

Para determinar el diámetro del separador se utilizó la ecuación 25. El valor del diámetro del separador obtenido por esta ecuación, es llevado al siguiente medio pie o valor comercial más próximo.

Paso 6.- Determinación del volumen de almacenamiento o volumen de Holdup.

Este volumen pudo ser obtenido mediante la ecuación 18, a partir de la selección del tiempo de Holdup requerido.

Paso 7.- Determinación del volumen de oleaje o volumen de Surge.

Este volumen pudo ser obtenido mediante la ecuación 21, a partir de la selección del tiempo de Surge requerido.

Paso 8.- Selección de la altura de líquido desde la línea tangente inferior del separador hasta el nivel bajo.

La selección de esta altura (H_{NBL}) pudo ser determinada por las siguientes relaciones:

- ▲ Para una presión de operación menor a 300 *psia* y un diámetro del separador menor a 10 *ft*, el valor de H_{NBL} debe ser de 1,25 *ft*.
- ▲ Para una presión de operación menor a 300 *psia* y un diámetro del separador mayor o igual a 10 *ft*, el valor de H_{NBL} debe ser de 0,5 *ft*.
- ▲ Para una presión de operación mayor o igual a 300 *psia*, sea cual sea el tamaño del diámetro del separador, el valor de H_{NBL} debe ser de 0,5 *ft*.

Paso 9.- Determinación de la altura de Holdup.

Esta altura comprendida entre el nivel bajo de líquido en el separador y el nivel normal, se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$H_H = \frac{V_H}{\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot D^2} \quad (\text{Ec. 57})$$

Svrcek y Monnery (1993) recomiendan como mínimo una altura de 1 *ft* desde el nivel bajo de líquido hasta el normal. Este límite se tomó en cuenta en la realización del programa.

Paso 10.- Determinación de la altura de Surge.

Esta altura comprendida entre el nivel normal de líquido en el separador y el nivel alto, se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$H_s = \frac{V_s}{\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot D^2} \quad (\text{Ec. 58})$$

Svrcek y Monnery (1993) recomiendan como valor mínimo una altura de 6 *in* desde el nivel normal de líquido hasta el nivel alto. Este límite se tomó en cuenta para la realización del programa.

Paso 11.- Determinación de la altura desde el nivel alto de líquido hasta la línea central de la boquilla de entrada

Para recipientes que poseen un deflector en la boquilla de entrada, se utilizó la ecuación 59:

$$H_{LIN} = \frac{12 + d_{ne}}{12} \quad (\text{Ec. 59})$$

Para recipientes que no poseen un deflector a la entrada, se utilizó la ecuación 60:

$$H_{LIN} = \frac{12 + \frac{d_{ne}}{2}}{12} \quad (\text{Ec. 60})$$

Para la determinación de la boquilla de entrada se utilizaron las ecuaciones descritas en el Apéndice A.

Paso 12.- Determinación de la altura desde la línea central de la boquilla de entrada hasta la tangente superior del separador.

Esta altura se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$H_D = 0,5 \cdot D \quad (\text{Ec. 61})$$

Sin embargo, se mantuvo como límite inferior, la distancia determinada mediante la siguiente expresión:

$$H_D = \frac{36 + d_{ne}/2}{12} \quad (\text{Ec. 62})$$

El programa determinó el valor de H_D como el mayor entre las ecuaciones 61 y 62 (Para ver el dimensionamiento de la boquilla de entrada ver Apéndice A).

Paso 13.- Determinación de la altura del recipiente

Se calculó como la suma de todas las alturas anteriores, tal como se muestra en la ecuación 26, aproximando el resultado al siguiente medio pie.

La figura 8 muestra las principales dimensiones de este tipo de separador.

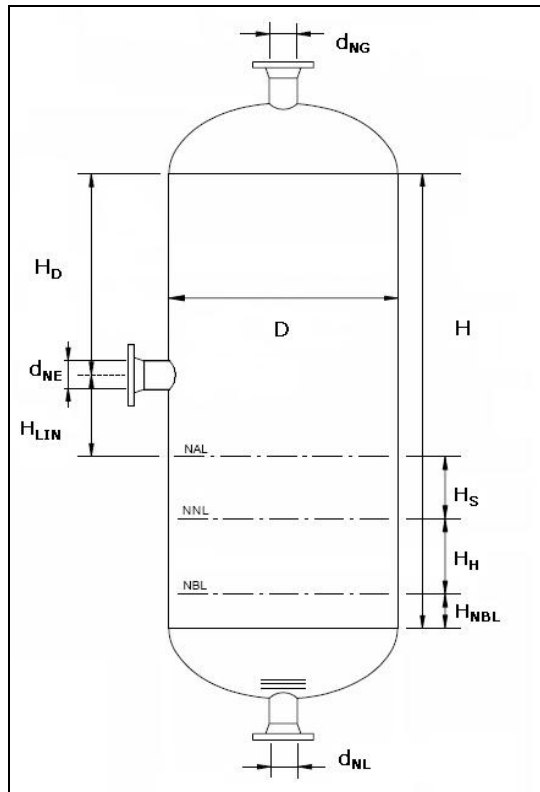


Figura 8. Esquema de un separador bifásico vertical líquido-vapor sin eliminador de niebla.

III.1.3.- Procedimientos de Ajuste

La hoja de cálculo dispone de un botón para el ajuste de la relación Altura-Diámetro del separador (**L/D**). El rango para el valor de esta relación, en el cual trabaja la programación de la hoja de cálculo está entre 1,5 y 5.

Si el parámetro **L/D** calculado es menor a 1,5 se despliega un dialogo al lado derecho de la casilla correspondiente a dicho valor en la hoja de cálculo que muestra la frase *“Se debe ajustar el valor de L/D”*. En este caso al presionar el botón *“Ajustar L/D”*, el programa va incrementando las alturas de Holdup y Surge calculadas inicialmente, **H_H** y **H_S**, en una relación de 83.3% y 16.7% respectivamente. Esto incrementa la altura del separador **H**, hasta que la relación **L/D** alcance el valor mínimo por defecto (**L/D = 1,5**), punto en el cual se muestra la frase *“El valor de L/D ha sido ajustado”*.

Si el parámetro **L/D** calculado es mayor a 5 se despliega un dialogo al lado derecho de la casilla correspondiente a dicho valor en la hoja de cálculo que muestra la frase *“Se debe ajustar el valor de L/D”*. En este caso al presionar el botón *“Ajustar L/D”*, el programa va incrementando el valor del diámetro del separador **D**, hasta que la relación **L/D** alcance el valor máximo por defecto (**L/D = 5**), punto en el cual se muestra la frase *“El valor de L/D ha sido ajustado”*.

Si el parámetro **L/D** calculado se encuentra dentro del rango que posee el programa, se despliega un dialogo al lado derecho de la casilla correspondiente a dicho valor en la hoja de cálculo que muestra la frase *“El valor de L/D entra en el rango”*. En este caso al presionar el botón *“Ajustar L/D”*, el programa no realiza ningún cambio.

III.1.4.- Adicionales al dimensionamiento del Separador.

La hoja muestra una sección titulada *“Dimensionamiento de Internos a la Entrada del Separador”*, en la cual el usuario mediante la selección y aplicación de tres botones puede elegir que tipo de interno quiere agregar a la entrada del separador, y la hoja mostrará los valores de los principales parámetros involucrados en el

dimensionamiento del mismo. Los pasos utilizados para el dimensionamiento de estos internos se encuentran en el Apéndice B.

Cabe destacar que para el dimensionamiento de internos como deflectores en forma de T y codos de 90°, se utilizó el valor de la tensión superficial del líquido, el cual es un dato que tiene que ser introducido en el programa.

III.2.- Separador Vertical Líquido-Vapor con Extractor de Niebla

En esta sección se citan las bases de diseño y el procedimiento de cálculo vinculado en el dimensionamiento de separadores verticales líquido-vapor con el uso de extractores de niebla tipo malla.

III.2.1.- Bases de Diseño

Las bases de diseño que fueron seleccionadas para el dimensionamiento de este tipo de separador se mencionan a continuación:

- ▲ La velocidad de la fase vapor U_G , debe ser un valor comprendido entre el 75% y el 100% de la velocidad crítica de dicha fase U_C .
- ▲ El diámetro comercial del separador D , debe ir de medio pie en medio pie.
- ▲ El nivel de líquido o altura mínima que debe tener la zona de almacenamiento o Holdup H_H , es de 1 *ft*.
- ▲ El nivel de líquido o altura mínima que debe tener la zona de fluctuación por oleaje o Surge H_S , es de 0,5 *ft* o 6 *in*.
- ▲ La selección de la altura correspondiente al nivel bajo de líquido (H_{NBL}) está dada por la siguiente relación:
 - ✓ Para una presión de operación menor a 300 *psia* y un diámetro del separador menor a 10 *ft*, el valor de H_{NBL} debe ser de 1,25 *ft*.
 - ✓ Para una presión de operación menor a 300 *psia* y un diámetro del separador mayor o igual a 10 *ft*, el valor de H_{NBL} debe ser de 0,5 *ft*.
 - ✓ Para una presión de operación mayor o igual a 300 *psia*, sea cual sea el tamaño del diámetro del separador, el valor de H_{NBL} debe ser de 0,5 *ft*.

- ▲ El espesor recomendado para la malla eliminadora de niebla es de 6 *in*
- ▲ La altura mínima recomendada entre el tope de la malla eliminadora de niebla y la tangente superior del separador es de 1 *ft.*
- ▲ La relación Altura-Diámetro del separador L/D, debe estar entre 1,5 y 5.

III.2.2.- Procedimiento de cálculo

El procedimiento de diseño utilizado para la elaboración de la hoja de cálculo para este tipo de separador incluye los pasos mencionados a continuación:

Paso 1.- Introducción de los datos mínimos requeridos para llevar a cabo los cálculos del dimensionamiento del separador.

Se siguieron las indicaciones mostradas en el Paso No. 1, del Apartado III.1.2., excepto que en este caso no se requiere el valor del diámetro de partícula D_p . Del resto, todos los demás datos iniciales deben ser introducidos.

Paso 2.- Determinación de la densidad de la fase gas.

Ver indicaciones del Paso No. 2, del Apartado III.1.2.

Paso 3.- Determinación del flujo volumétrico de vapor a las condiciones actuales.

Ver indicaciones del Paso No. 3, del Apartado III.1.2.

Paso 4.- Determinación de la velocidad de vapor a partir de su velocidad crítica.

La velocidad crítica U_C , se determinó mediante la ecuación 3, haciendo uso de las correlaciones de la constante K delimitadas por la presión de operación del recipiente en las ecuaciones 8, 9 y 10.

El valor de la velocidad de vapor U_G , estipulado dentro del programa es el 100% de la velocidad crítica U_C (este porcentaje puede ser modificado por el usuario).

Paso 5.- Determinación del diámetro del recipiente.

Ver indicaciones mostradas en el Paso No. 5, del Apartado III.1.2.

Para el caso donde el recipiente bifásico líquido-vapor dispone el uso de un extractor de niebla se considera la adición de 3 a 6 in en el diámetro calculado mediante la ecuación 25, para la instalación del soporte del extractor de niebla dentro del recipiente. Posteriormente el diámetro debe ser redondeado a un valor comercial. Sin embargo, este punto queda por parte del vendedor y no se consideró en la elaboración de la hoja de cálculo.

Paso 6.- Determinación del volumen de almacenamiento o volumen de Holdup.

Ver indicaciones del Paso No. 6, del Apartado III.1.2.

Paso 7.- Determinación del volumen de oleaje o volumen de Surge.

Ver indicaciones del Paso No. 7, del Apartado III.1.2.

Paso 8.- Selección de la altura de líquido desde la línea tangente inferior del separador hasta el nivel bajo.

Ver indicaciones del Paso No. 8, del Apartado III.1.2.

Paso 9.- Determinación de la altura de Holdup.

Ver indicaciones del Paso No. 9, del Apartado III.1.2.

Paso 10.- Determinación de la altura de Surge.

Ver indicaciones del Paso No. 10, del Apartado III.1.2.

Paso 11.- Determinación de la altura desde el nivel alto de líquido hasta la línea central de la boquilla de entrada

Ver indicaciones del Paso No. 11, del Apartado III.1.2.

Paso 12.- Determinación de la altura desde la línea central de la boquilla de entrada hasta la línea de fondo del extractor de niebla.

Esta altura pudo ser calculada mediante la ecuación 61 (Paso No. 12, del Apartado III.1.2.)

Sin embargo, este valor tiene un límite inferior, el cual se determinó mediante la siguiente expresión:

$$H_D = \frac{24 + d_{ne}/2}{12} \quad (\text{Ec. 63})$$

El programa selecciona el valor de H_D como el mayor valor resultado de las ecuaciones 61 y 63.

Paso 13.- Determinación de la altura desde la línea de fondo del extractor de niebla hasta la tangente superior del separador.

Svrcek y Monnery (1993) recomiendan una altura de 6 in como espesor del extractor de niebla y 1 ft desde el tope de la malla hasta la línea tangente tope del recipiente.

En este sentido, esta altura expresada como H_{ME} tiene un valor mínimo recomendado de 1,5 ft, el cual fue incluido en el presente programa.

Paso 14.- Determinación de la altura del recipiente

Esta altura total pudo ser calculada como la suma de todas las alturas anteriores, tal como se muestra en la ecuación 27. El programa aproxima el valor de la altura al siguiente medio pie más próximo.

En la figura 9 se muestran las principales dimensiones de este tipo de separador.

III.2.3.- Procedimientos de Ajuste

Se aplicó el procedimiento expresado en el Apartado III.1.3.

III.2.4.- Adicionales al dimensionamiento del Separador.

Ver Apartado III.1.4

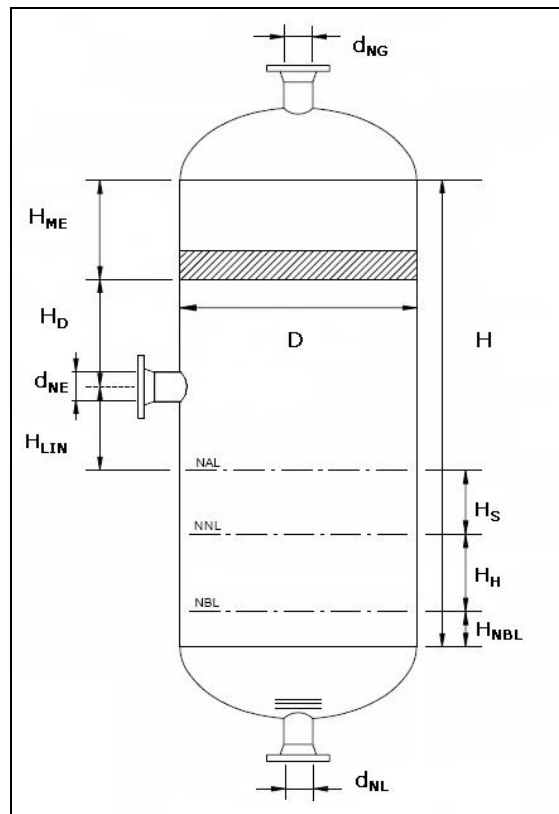


Figura 9. Esquema de un separador bifásico vertical líquido-vapor con eliminador de niebla tipo malla.

III.3.- Separador Vertical Líquido-Vapor con Aletas en 1 Etapa

En esta sección se citan las bases de diseño y el procedimiento de cálculo vinculado con el dimensionamiento de separadores verticales líquido-vapor con el uso de extractores de niebla tipo Aleta, en una etapa.

III.3.1.- Bases de Diseño

Las bases de diseño que fueron seleccionadas para el dimensionamiento de este tipo de separador se mencionan a continuación:

- ▲ Valores de profundidad de la caja de aleta t_{vb} , en el rango comprendido entre $0,98 \text{ ft}$ y $1,48 \text{ ft}$.
- ▲ Este tipo de separador es comúnmente usado cuando el parámetro de flujo en la cara de la aleta θ_v es menor a $0,01$.

- ▲ Para la altura entre el nivel alto de líquido y el fondo del paquete de aletas X_1 se recomienda una altura mayor o igual a 1,64 *ft.*
- ▲ Para la altura entre el tope del paquete de aletas y la tangente superior del separador X_2 se recomienda una altura mayor o igual a 0.33 *ft.*
- ▲ Se recomienda usar este tipo de separador para parámetros de flujo de la alimentación θ_{feed} menores a 0,01. De lo contrario se debe utilizar el separador vertical con aletas en dos etapas.
- ▲ El diámetro del separador D debe ser mayor o igual a 1,97 *ft.*
- ▲ El espacio mínimo requerido entre la caja de aletas y la pared del recipiente para la instalación, remoción e inspección, es de 0.33 *ft.*
- ▲ La altura de la aletas h_v deben ser mayor o igual a 0,98 *ft* y menor o igual a 4,92 *ft.*
- ▲ La cara del paquete de aletas debe ser perpendicular a la línea central de las boquillas de alimentación y salida de gas.
- ▲ La sección transversal de la boquilla de entrada debe ser como mínimo el 15% del área superficial de las aletas A_v .
- ▲ El diámetro de la boquilla de salida de vapor no debe ser menor que el diámetro de la boquilla de entrada.
- ▲ La relación Altura-Diámetro del separador L/D debe estar entre 1,5 y 5.

III.3.2.- Procedimiento de cálculo

El procedimiento de diseño utilizado para la elaboración de la hoja de cálculo para este tipo de separador incluye los pasos mencionados a continuación:

Paso 1.- Introducción de los datos mínimos requeridos para llevar a cabo los cálculos del dimensionamiento del separador.

Es requerido conocer algunos datos sobre la operación del separador y las condiciones de las fases involucradas, tales como:

- ▲ Presión de operación **P**, la cual es requerida en la unidad *psig*. Posteriormente el programa realiza el cambio a la unidad *psia* mediante la ecuación 50.
- ▲ Temperatura de operación **T**, la cual es requerida en la unidad $^{\circ}F$. Posteriormente el programa realiza el cambio a la unidad $^{\circ}R$ mediante la ecuación 51.
- ▲ Profundidad de la caja de aletas **t_{vb}**, el cual debe ser un valor comprendido entre 0,98 *ft* y 1,48 *ft*. Ver bases de diseño, Apartado III.3.1.
- ▲ Parámetro de flujo en la cara de las aletas **θ_v**. Se colocó como defecto un valor máximo de 0,01. Ver bases de diseño, Apartado III.3.1.
- ▲ Porcentaje de sobre diseño en el flujo de gas **%Diseño**.
- ▲ Tiempo de residencia de la fase líquida **t_R**, en minutos (*min*).
- ▲ Altura entre el nivel alto de líquido y el fondo del paquete de aletas **X₁** en *ft*. Ver bases de diseño, Apartado III.3.1.
- ▲ Altura entre el tope del paquete de aletas y la tangente superior del separador **X₂** en *ft*. Ver bases de diseño, Apartado III.3.1.
- ▲ Tensión interfacial entre el líquido y el vapor **σ**, en *dinas/cm*.

En el caso particular de la fase vapor se necesitan introducir los siguientes datos:

- ▲ Flujo volumétrico en condiciones estándares **Q_{GS}**, en millones de pies cúbicos estándares por día (*MMSCFD*).
- ▲ Peso molecular de la fase **PM**, en *lb/lb-mol*.
- ▲ Factor de compresibilidad **Z**.

Para el caso de la fase líquida se necesitan introducir los siguientes datos:

- ▲ Flujo volumétrico **Q_L**, en barriles por día (*BPD*). Posteriormente el programa realiza el cambio a *ft³/s* mediante la ecuación 52.
- ▲ Viscosidad de la fase líquida **μ_L**, en *cP*.
- ▲ Algunos de los siguientes datos de relación directa con la densidad **ρ_L**:
 - ✓ Densidad **ρ_L**, en *lb/ft³*.

- ✓ Gravedad API ($^{\circ}API$). El programa realiza el cambio a lb/ft^3 mediante la ecuación 53.
- ✓ Gravedad específica (s.g.). El programa realiza el cambio a lb/ft^3 mediante la ecuación 54.

Paso 2.- Determinación de la densidad de la fase gas.

Ver indicaciones del Paso No. 2, del Apartado III.1.2.

Paso 3.- Determinación del flujo volumétrico de vapor a las condiciones actuales.

Ver indicaciones del Paso No. 3, del Apartado III.1.2.

Paso 4.- Determinación del parámetro de flujo de la alimentación

Este parámetro fue determinado mediante la ecuación 17. Se recomienda que el parámetro de flujo en la alimentación sea menor a 0,01.

Paso 5.- Determinación del caudal o flujo volumétrico máximo de vapor.

El caudal máximo de vapor fue determinado mediante la ecuación 15.

Paso 6.- Determinación del Número de Arquímedes.

El número de Arquímedes pudo ser calculado mediante la ecuación 16.

Paso 7.- Determinación del máximo factor de carga de vapor permitido.

Para el cálculo de este factor se debió considerar dos posibilidades dependiendo del número de Arquímedes.

- ▲ Para números de Arquímedes mayores a 225, el cual resulta ser el caso más común, el máximo factor de carga de vapor debió ser calculado por la ecuación 13.
- ▲ Para números de Arquímedes menores o igual a 225, el máximo factor de carga debió ser determinado por la ecuación 14.

Paso 8.- Determinación del área superficial de las aletas

Esta área fue determinada a partir del caudal de gas y el factor de carga máximo permitido, mediante la siguiente ecuación:

$$A_v = \frac{Q_{máx}^*}{\lambda_{vmáx}} \quad (\text{Ec. 64})$$

Paso 9.- Determinación de la altura de las aletas.

Se determinó a partir del área superficial de las aletas, mediante la siguiente ecuación:

$$H_v = \sqrt{1.5 \cdot A_v} \quad (\text{Ec. 65})$$

El valor de H_v tuvo que cumplir con el siguiente criterio: ser mayor o igual a 0,98 ft y menor o igual a 4,92 ft.

Paso 10.- Determinación del ancho de las aletas.

El ancho de las aletas fue determinado por la siguiente ecuación:

$$W_v = \frac{A_v}{H_v} \quad (\text{Ec. 66})$$

Paso 11.- Determinación del ancho del paquete de aletas

El ancho del paquete de aletas fue calculado mediante la siguiente ecuación:

$$W_{vb} = W_v + 0,3821 \quad (\text{Ec. 67})$$

Paso 12.- Determinación del diámetro del recipiente.

El diámetro del separador tuvo que cumplir los siguientes criterios:

- ✦ *Criterio Requerido para el Paquete de aletas:* dado por la ecuación 28.
- ✦ *Criterio de Accesibilidad:* dado por la ecuación 29.

Luego el valor del diámetro del separador obtenido al cumplir con ambos criterios, debe ser llevado al siguiente medio pie o valor comercial más próximo.

Paso 13.- Determinación de la altura del paquete de vena.

Esta altura tiene que incluir un margen de seguridad para obtener suficiente cobertura de la vena y evitar que el vapor se desvíe hacia el compartimiento de líquido. La altura también es importante para el adecuado drenaje del líquido separado. Debido a lo antes mencionado dicha altura fue determinada mediante la siguiente ecuación:

$$H_{vb} = H_v + 0.9843 \quad (\text{Ec. 68})$$

Paso 14.- Determinación de la altura de almacenamiento de líquido

Pudo ser determinada mediante la siguiente ecuación:

$$H_L = \frac{Q_L \cdot t_R \cdot 240}{\pi \cdot D^2} \quad (\text{Ec. 69})$$

Paso 15.- Determinación de la altura del recipiente

Fue calculada como la suma de la altura del paquete de vena, la altura de almacenamiento de líquido, la altura entre el nivel alto de líquido y el fondo del paquete de vena (para el cual se recomienda un valor mayor o igual a 1,6405 *ft*), y la altura entre el tope del paquete de vena y la tangente superior del separador (para el cual se recomienda un valor mayor o igual a 0.3281 *ft*), a través de la ecuación 30. El programa aproxima el valor de la altura al siguiente medio pie más próximo.

La figura 10 muestra las principales dimensiones de este separador.

III.3.3.- Procedimientos de Ajuste

La hoja de cálculo dispone de un botón para el ajuste de la relación Altura-Diámetro del separador (**L/D**). El rango para el valor de esta relación, en el cual trabaja la programación de la hoja de cálculo está entre 1,5 y 5.

Si el parámetro **L/D** calculado es menor a 1,5 se despliega un dialogo al lado derecho de la casilla correspondiente a dicho valor en la hoja de cálculo que muestra la frase “*Se debe ajustar el valor de L/D*”. En este caso al presionar el botón “*Ajustar L/D*”, el

programa va incrementando la altura de almacenamiento de líquido H_L , esto incrementa la altura del separador H , hasta que la relación L/D alcanza el valor mínimo por defecto ($L/D = 1,5$), punto en el cual se muestra la frase “El valor de L/D ha sido ajustado”.

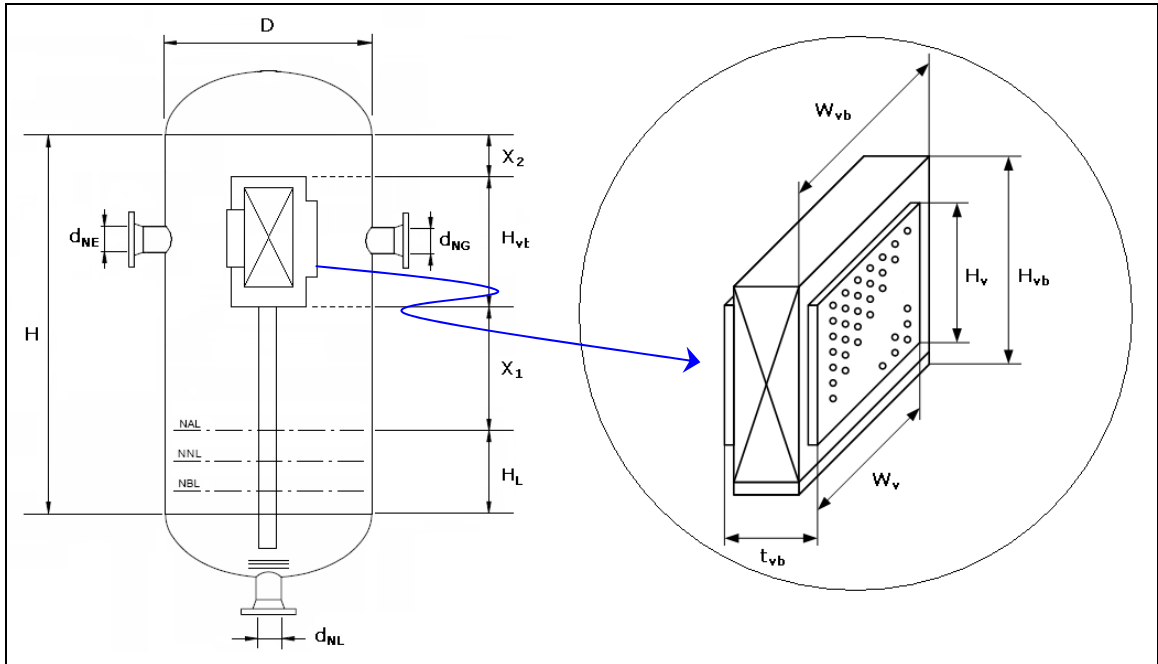


Figura 10. Esquema de un separador bifásico vertical líquido-vapor con paquete de aleta en una etapa.

Si el parámetro L/D calculado es mayor a 5 se despliega un dialogo al lado de la casilla correspondiente a dicho valor en la hoja de cálculo que muestra la frase “Se debe ajustar el valor de L/D ”. En este caso al presionar el botón “Ajustar L/D ”, el programa va incrementando el valor del diámetro del separador D , hasta que la relación L/D alcanza el valor máximo por defecto ($L/D = 5$), punto en el cual se muestra la frase “El valor de L/D ha sido ajustado”.

Si el parámetro L/D calculado se encuentra dentro del rango que posee el programa, se despliega un dialogo al lado derecho de la casilla correspondiente a dicho valor en la hoja de cálculo que muestra la frase “El valor de L/D entra en el rango”. En este caso al presionar el botón “Ajustar L/D ”, el programa no realiza ningún cambio.

III.4.- Separador Vertical Líquido-Vapor con Vena en 2 Etapas

En esta sección se citan las bases de diseño y el procedimiento de cálculo vinculado con el dimensionamiento de separadores verticales líquido-vapor con el uso de extractores de niebla tipo Vena, en dos etapas.

III.4.1.- Bases de Diseño

Las bases de diseño que fueron seleccionadas para el dimensionamiento de este tipo de separador se mencionan a continuación:

- ▲ Se recomiendan valores de profundidad de la caja de vena t_{vb} , en el rango comprendido entre $0,98\text{ ft}$ y $1,48\text{ ft}$.
- ▲ Este tipo de separador es comúnmente usado cuando el parámetro de flujo en la cara de la vena θ_v es mayor a $0,01$.
- ▲ Para la altura entre el nivel alto de líquido y el fondo del plato perforado Y_1 se recomienda como valor mínimo $0,49\text{ ft}$.
- ▲ Para la altura entre el tope del plato perforado y el fondo del paquete de vena Y_2 se recomienda como valor mínimo $0,98\text{ ft}$.
- ▲ Para la altura entre el tope del paquete de vena y la tangente superior del separador Y_3 se recomienda una altura mayor o igual a $0,33\text{ ft}$.
- ▲ Se recomienda usar este tipo de separador para parámetros de flujo θ_{feed} mayores a $0,01$. De lo contrario se debe utilizar el separador vertical con vena en dos etapas.
- ▲ El diámetro del separador D debe ser mayor o igual a $1,97\text{ ft}$.
- ▲ El espacio mínimo requerido entre la caja de vena y la pared del recipiente para la instalación, remoción e inspección, es de $0,33\text{ ft}$.
- ▲ La altura de la vena h_v debe ser mayor o igual a $0,98\text{ ft}$, y menor o igual a $4,92\text{ ft}$.
- ▲ La cara del paquete de vena debe ser perpendicular a la línea central de las boquillas de alimentación y salida de gas.

- ▲ La sección transversal de la boquilla de entrada debe ser como mínimo el 15% del área superficial de la vena A_v .
- ▲ El diámetro de la boquilla de salida de vapor no debe ser menor que el diámetro de la boquilla de entrada.
- ▲ La relación Altura-Diámetro del separador L/D debe estar entre 1,5 y 5.

III.4.2.- Procedimiento de cálculo

El procedimiento de diseño utilizado en la elaboración de la hoja de cálculo para este tipo de separador incluye los pasos mencionados a continuación:

Paso 1.- Introducción de los datos mínimos requeridos para llevar a cabo los cálculos del dimensionamiento del separador.

Se requieren conocer algunos datos sobre la operación del separador y las condiciones de las fases involucradas, tales como:

- ▲ Presión de operación P , la cual es requerida en la unidad *psig*. Posteriormente el programa realiza el cambio a la unidad *psia* mediante la ecuación 50.
- ▲ Temperatura de operación T , la cual es requerida en la unidad $^{\circ}F$. Posteriormente el programa realiza el cambio a la unidad $^{\circ}R$ mediante la ecuación 51..
- ▲ Profundidad de la caja de vena t_{vb} , el cual debe ser un valor comprendido entre 0,98 *ft* y 1,48 *ft*.
- ▲ Parámetro de flujo en la cara de la vena θ_v . Se tuvo como defecto un valor máximo de 0,01. Ver bases de diseño, Apartado III.3.1.
- ▲ Porcentaje de sobre diseño en el flujo de gas $\%_{\text{Diseño}}$.
- ▲ Tiempo de residencia de la fase líquida t_R , en minutos (*min*).
- ▲ Altura entre el tope del paquete de vena y la tangente superior del separador Y_3 en *ft*. Ver bases de diseño, Apartado III.4.1.
- ▲ Tensión interfacial entre el líquido y el vapor σ , en *dinas/cm*.

En el caso particular de la fase vapor se deben introducir los siguientes datos:

- ▲ Flujo volumétrico en condiciones estándares Q_{GS} , en millones de pies cúbicos estándares por día (*MMSCFD*).
- ▲ Peso molecular de la fase PM , en *lb/lb-mol*.
- ▲ Factor de compresibilidad Z .

Para el caso de la fase líquida se tienen que introducir los siguientes datos:

- ▲ Flujo volumétrico Q_L , en barriles por día (*BPD*). Posteriormente el programa realiza el cambio a ft^3/s mediante la ecuación 52.
- ▲ Viscosidad de la fase líquida μ_L , en *cP*.
- ▲ Algunos de los siguientes datos de relación directa con la densidad ρ_L :
 - ✓ Densidad ρ_L , en *lb/ft³*.
 - ✓ Gravedad API ($^{\circ}API$). El programa realiza el cambio a *lb/ft³* mediante la ecuación 53.
 - ✓ Gravedad específica (s.g.). El programa realiza el cambio a *lb/ft³* mediante la ecuación 54.

Paso 2.- Determinación de la densidad de la fase gas.

Ver indicaciones del Paso No. 2, del Apartado III.1.2.

Paso 3.- Determinación del flujo volumétrico de vapor a las condiciones actuales.

Ver indicaciones del Paso No. 3, del Apartado III.1.2.

Paso 4.- Determinación del parámetro de flujo de la alimentación

Ver indicaciones del Paso No. 4, del Apartado III.3.2.

Paso 5.- Determinación del caudal o flujo volumétrico máximo de vapor.

Ver indicaciones del Paso No. 5, del Apartado III.3.2.

Paso 6.- Determinación del Número de Arquímedes.

Ver indicaciones del Paso No. 6, del Apartado III.3.2.

Paso 7.- Determinación del máximo factor de carga de vapor permitido.

Ver indicaciones del Paso No. 7, del Apartado III.3.2.

Paso 8.- Determinación del área superficial de la vena

Ver indicaciones del Paso No. 8, del Apartado III.3.2.

Paso 9.- Determinación del parámetro del Schoepentoeter.

Este parámetro no debe exceder los 0,656 ft/s para no esperar oleaje en la entrada del separador. El programa calcula este parámetro a partir de la siguiente ecuación:

$$\lambda_{m\acute{a}x} = 0,3281 + 0,026248 \cdot (\rho_G \cdot 1,49)^{-0,14} \cdot \theta_{feed}^{-0,76} \quad (\text{Ec. 70})$$

Si por el contrario se espera oleaje este valor debe ser igual a 0,328 ft/s.

Paso 10.- Determinación del diámetro del recipiente.

El diámetro del separador tiene que cumplir los siguientes criterios:

- ✦ *Criterio de Separación Primaria (Shoepentoeter):* calculado por la ecuación 31.
- ✦ *Criterio de Desgasificación:* determinado mediante la ecuación 32.
- ✦ *Criterio de De-foaming:* dado por la ecuación 33.
- ✦ *Criterio para la distribución del flujo en la cara de la vena:* determinado a partir de la ecuación 34.
- ✦ *Criterio de Accesibilidad:* dado por la ecuación 29.

El valor del diámetro del separador obtenido que cumpla con todos criterios debe ser llevado al siguiente medio pie o valor comercial más próximo.

Paso 11.- Determinación del máximo ancho que debe tener la vena.

El ancho del paquete de vena pudo ser determinado por la siguiente ecuación:

$$W_v = \sqrt{(D - 0,656)^2 - t_{vb}^2} - 0.3281 \quad (\text{Ec. 71})$$

Paso 12.- Determinación de la altura de la vena.

Esta altura se calculó usando el área superficial de la vena, mediante la siguiente ecuación:

$$H_v = \frac{A_v}{W_v} \quad (\text{Ec. 72})$$

El valor de H_v tiene que cumplir con el siguiente criterio: debe ser mayor o igual a 0,98 ft y menor o igual a 4,92 ft.

Paso 13.- Determinación del ancho del paquete de vena

Ver indicaciones del Paso No. 11, del Apartado III.3.2.

Paso 14.- Determinación de la altura del paquete de vena.

Ver indicaciones del Paso No. 13, del Apartado III.3.2.

Paso 15.- Determinación de la altura de almacenamiento de líquido

Ver indicaciones del Paso No. 14, del Apartado III.3.2.

Paso 16.- Determinación de la altura entre el nivel alto de líquido y el fondo del Schoepentoeter

Esta distancia determinada por la ecuación 73, debe ser como mínimo de 0,49 ft.

$$Y_1 = 0,05 \cdot D \quad (\text{Ec. 73})$$

Paso 17.- Determinación de la altura del Schoepentoeter

La altura del Schoepentoeter H_p , se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$H_p = \frac{d_{NE}}{12} + 0.0656 \quad (\text{Ec. 74})$$

Para ver el dimensionamiento de la boquilla de entrada, ir al Apéndice A

Paso 18.- Determinación de la altura entre el tope del Schoepentoeter y el fondo del paquete de vena

Esta distancia determinada por la ecuación 75, debe ser como mínimo de 0,98 ft.

$$Y_2 = 0,5 \cdot D \quad (\text{Ec. 73})$$

Paso 19.- Determinación de la altura del recipiente

Se calculó como la suma de las diferentes secciones que conforman el separador, tal como se muestra en la ecuación 35. El programa aproxima el valor de esta altura al siguiente medio pie más próximo.

La figura 11 muestra las principales dimensiones de este separador:

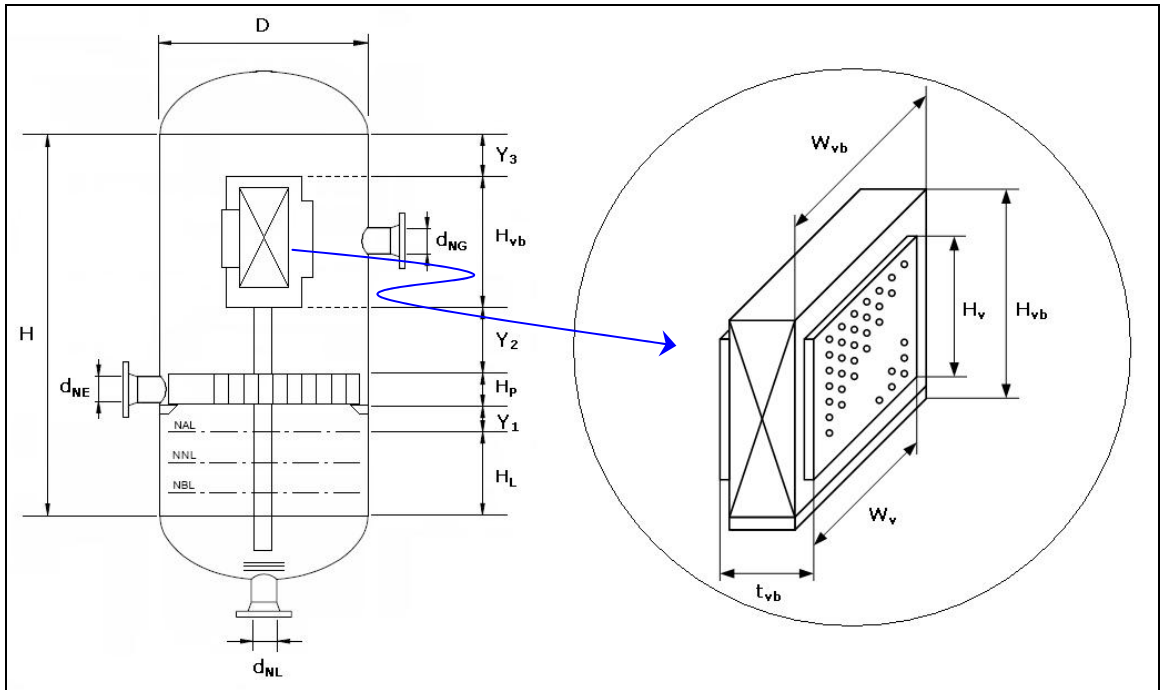


Figura 11. Esquema de un separador bifásico vertical líquido-vapor con paquete de aleta en dos etapas.

III.4.3.- Procedimientos de Ajuste

Se aplicó el procedimiento expresado en el Apartado III.1.3.

III.5.- Separador Horizontal Líquido-Vapor sin Extractor de Niebla

En esta sección se citan las bases de diseño y el procedimiento de cálculo vinculado con el dimensionamiento de separadores horizontales líquido-vapor sin el uso de extractores de niebla.

III.5.1.- Bases de Diseño

Las bases de diseño que fueron seleccionadas para el dimensionamiento de este tipo de separador se mencionan a continuación:

- ▲ El diámetro de partícula D_P por defecto es tomado como 150 *micrones*.
- ▲ La velocidad de la fase vapor U_G , debe ser un valor comprendido entre el 75% y el 100% de la velocidad crítica de dicha fase U_C .
- ▲ Los diámetros comerciales del separador D , van de medio pie en medio pie.
- ▲ Para un diámetro del separador menor o igual a 4 *ft*, la altura correspondiente al nivel bajo de líquido debe ser de 9 *in*.
- ▲ La altura ocupada por la fase vapor H_G , es igual al máximo valor entre el 20% del diámetro o 1 *ft*.
- ▲ La longitud del separador L , debe ser mayor o igual que la longitud mínima requerida para que ocurra la separación de las gotas de líquido en la fase vapor L_{MIN} .
- ▲ La relación Longitud-Diámetro del separador L/D debe estar entre 1,5 y 5.

III.5.2.- Procedimiento de cálculo

El procedimiento de diseño utilizado en la elaboración de la hoja de cálculo para este tipo de separador incluye los pasos mencionados a continuación:

Paso 1.- Introducción de los datos mínimos requeridos para llevar a cabo los cálculos del dimensionamiento del separador.

Se siguieron las indicaciones mostradas en el Paso No. 1, del Apartado III.1.2., excepto que en este caso se requirió adicionalmente un valor inicial estimado para la relación Longitud-Diámetro del separador L/D , el cual debe ser un valor entre 1,5 y 5.

Paso 2.- Determinación de la densidad de la fase gas.

Ver indicaciones del Paso No. 2, del Apartado III.1.2.

Paso 3.- Determinación del flujo volumétrico de vapor a las condiciones actuales.

Ver indicaciones del Paso No. 3, del Apartado III.1.2.

Paso 4.- Determinación de la velocidad de vapor a partir de su velocidad crítica.

Ver indicaciones del Paso No. 4, del Apartado III.1.2.

Paso 5.- Determinación del volumen de almacenamiento o volumen de Holdup.

Ver indicaciones del Paso No. 6, del Apartado III.1.2.

Paso 6.- Determinación del volumen de oleaje o volumen de Surge.

Ver indicaciones del Paso No. 7, del Apartado III.1.2.

Paso 7.- Determinación del diámetro del recipiente.

Para determinar el diámetro del separador se utilizó la ecuación 36. Este valor debe ser llevado al siguiente medio pie o valor comercial más próximo.

Paso 8.- Determinación del área de la sección transversal del separador

Esta área transversal del cilindro pudo ser calculada mediante la ecuación 76.

$$A_T = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (\text{Ec. 76})$$

Paso 9.- Selección de la altura de líquido desde la línea tangente inferior del separador hasta el nivel bajo.

Esta altura (H_{NBL}) fue seleccionada mediante la siguiente ecuación:

$$H_{NBL} = \frac{0,5 \cdot D + 7}{12} \quad (\text{Ec. 77})$$

Si el valor del diámetro es menor o igual a 4 *ft*, el valor correspondiente a la altura siempre será 9 *in*.

Paso 10.- Determinación del área correspondiente al ocupado por el nivel bajo de líquido.

El área ocupada por el nivel bajo de líquido en el separador respecto al área total transversal se determinó mediante el procedimiento de longitud de cuerda de una circunferencia (Ver Apéndice C), teniendo como base la relación entre la altura de líquido correspondiente al nivel bajo y el diámetro del separador. Esto se aplicó a través de la ecuación C3, partiendo de las siguientes dos ecuaciones:

$$x = \frac{H_{NBL}}{D} \quad (\text{Ec. 78})$$

$$y = \frac{A_{NBL}}{A_T} \quad (\text{Ec. 79})$$

Posteriormente, el área ocupada por el nivel bajo de líquido se calculó al despejar A_{NBL} , de la ecuación 79.

Paso 11.- Determinación de la altura ocupada por la fase vapor.

Esta se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$H_G = 0,2 \cdot D \quad (\text{Ec. 80})$$

El valor arrojado por la ecuación 80 se comparó con 1 *ft*, y se tomó el mayor valor como resultado de H_G .

Paso 12.- Determinación del área ocupado por la fase vapor.

El área ocupada por la fase vapor en el separador respecto al área total transversal se determinó mediante el procedimiento de longitud de cuerda de una circunferencia (Ver Apéndice C), teniendo como base la relación entre la altura correspondiente a la

fase vapor y el diámetro del separador. Esto se aplicó a través de la ecuación C3, partiendo de las siguientes dos ecuaciones:

$$x = \frac{H_G}{D} \quad (\text{Ec. 81})$$

$$y = \frac{A_G}{A_T} \quad (\text{Ec. 82})$$

Posteriormente, el área ocupada por la fase vapor se calculó al despejar A_G , de la ecuación 82.

Paso 13.- Determinación de la longitud del separador.

Esta longitud se determinó a través de la ecuación 37. El programa aproxima el valor de longitud al siguiente medio pie más próximo.

Paso 14.- Determinación del tiempo requerido para la separación de las gotas de líquido de la fase vapor

Este tiempo se calculó mediante la ecuación 22.

Paso 15.- Determinación de la velocidad actual de vapor

La cual fue obtenida mediante la siguiente ecuación:

$$U_{GA} = \frac{Q_{GA}}{A_G} \quad (\text{Ec. 83})$$

Paso 16.- Determinación de la longitud mínima requerida para la separación líquido-vapor

Esta longitud pudo ser calculada mediante la ecuación 38.

La longitud del separador L tiene que ser mayor o igual que la longitud mínima de separación L_{MIN} , ver el procedimiento de ajuste, Apartado III.5.3.

Paso 17.- Determinación del área transversal correspondiente al nivel normal de líquido

La cual fue calculada a través de la ecuación:

$$A_{NNL} = A_{NBL} + \frac{V_H}{L} \quad (\text{Ec. 84})$$

Paso 18.- Determinación de la altura correspondiente al nivel normal de líquido

La relación entre la altura correspondiente al nivel normal de líquido respecto al diámetro del separador se determinó mediante el procedimiento de longitud de cuerda de una circunferencia (Ver Apéndice C), teniendo como base la relación entre el área transversal correspondiente al nivel normal de líquido y el área transversal total del separador. Esto se aplicó a través de la ecuación C6, partiendo de las siguientes dos ecuaciones:

$$x = \frac{A_{NNL}}{A_T} \quad (\text{Ec. 85})$$

$$y = \frac{H_{NNL}}{D} \quad (\text{Ec. 86})$$

Posteriormente, el área ocupada por la fase vapor se calculó al despejar H_{NNL} , de la ecuación 86.

Paso 19.- Determinación de la altura correspondiente al nivel alto de líquido

La cual fue determinada a través de la ecuación:

$$H_{NAL} = D - H_G \quad (\text{Ec. 87})$$

En la figura 12 se muestran las principales dimensiones de este tipo de separador.

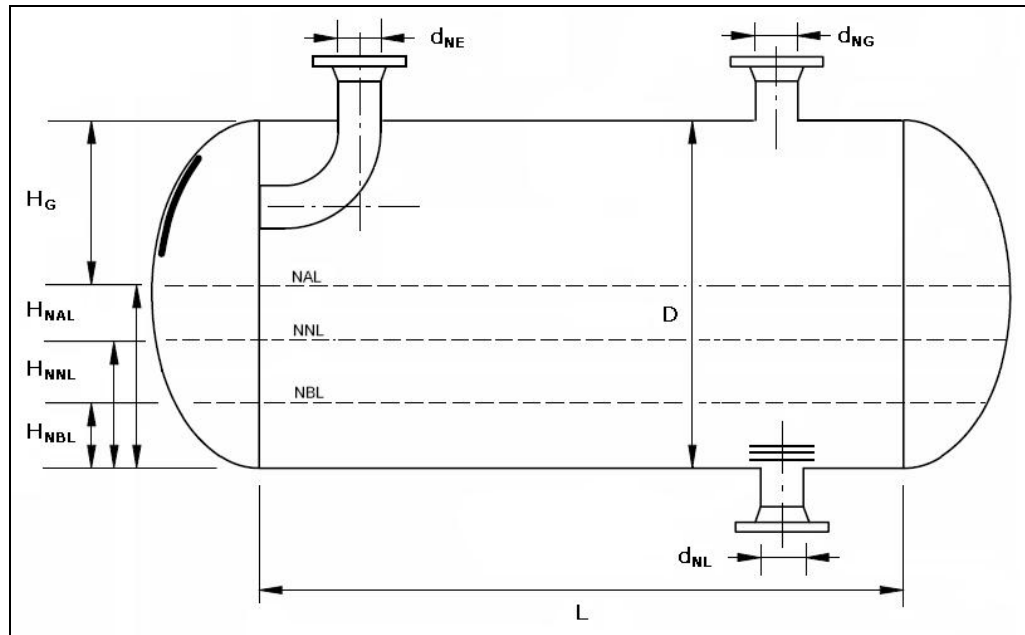


Figura 12. Esquema de un separador bifásico horizontal líquido-vapor sin eliminador de niebla.

III.5.3.- Procedimientos de Ajuste

La hoja de cálculo dispone de un botón para el ajuste de la longitud del separador L , y un botón para el ajuste de la relación Longitud-Diámetro del separador L/D . El ajuste de la longitud del separador L , se realizó en función del valor de la longitud mínima requerida para que se logre la separación de las fases L_{MIN} ; y el ajuste de la relación Longitud-Diámetro del separador L/D , se realizó en función de un rango interno en el programa el cual limita este valor de relación entre 1,5 y 5.

La hoja también dispone de otros dos botones que eliminan los cambios hechos al ajustar las variables.

a) Ajuste de la longitud del separador (L):

Para que el diseño del separador horizontal sea adecuado la longitud del separador debe ser mayor o igual a la longitud mínima requerida para que se logre la separación de las gotas de líquido suspendidas en la fase vapor.

Si el valor correspondiente a la longitud mínima requerida para que ocurra la separación L_{MIN} , es mayor que el valor correspondiente a la longitud del separador L , en un 20% o más del valor de L ($L_{MIN} > 1,2 * L$), aparece en la hoja de cálculo al lado derecho de la casilla correspondiente al resultado de la variable L_{MIN} , la frase “*Se debe ajustar el valor de L*”. Esta frase le indica al usuario que debe apretar el botón “*Ajustar L*”, con lo cual el programa va incrementando el valor mínimo de la altura del separador ocupada por la fase vapor H_G , ocasionando así una disminución de la altura destinada al almacenamiento de los volúmenes de líquido (V_H y V_S), y un aumento de la longitud del separador L para que puedan ser almacenados dichos volúmenes. Una vez que el valor de L_{MIN} sea mayor que el valor de L en menos de un 20% ($L_{MIN} > L$ y $L_{MIN} < 1,2 * L$), el programa iguala el valor de la longitud del separador al valor de la longitud mínima de separación ($L = L_{MIN}$), punto en el cual aparece la frase “*El valor de L ha sido ajustado*”.

Si por el contrario el valor de L es mayor al valor de L_{MIN} , aparece en la hoja la frase “*El valor de L entra en el rango*”, esto le indica al usuario que las dimensiones del separador son adecuadas para que ocurra la separación de las fases. En este punto el botón “*Ajuste de L*” queda inhabilitado.

b) Ajuste de la relación Longitud-Diámetro del separador (L/D):

Si el parámetro L/D calculado es menor a 1,5 se despliega un dialogo al lado derecho de la casilla correspondiente a dicho valor en la hoja de cálculo que muestra la frase “*Se debe ajustar el valor de L/D*”. En este caso al presionar el botón “*Ajustar L/D*”, el programa va incrementando el valor de L/D asumido por el usuario e introducido como dato inicial, siempre y cuando este sea menor que 5. Con el incremento del valor de L/D asumido, el valor del diámetro calculado disminuye, disminuyendo los valores de las alturas destinadas al almacenamiento de los volúmenes de líquido y por ende aumenta la longitud requerida del separador. Este proceso se repite hasta que la relación L/D calculada alcance el valor mínimo por defecto ($L/D = 1,5$), punto en el cual se muestra la frase “*El valor de L/D ha sido ajustado*”.

Si el parámetro L/D calculado es mayor a 5 se despliega un dialogo al lado derecho de la casilla correspondiente a dicho valor en la hoja de cálculo que muestra la frase “*Se debe ajustar el valor de L/D*”. En este caso al presionar el botón “*Ajustar L/D*”, el programa va incrementando el valor del diámetro del separador D , hasta que la relación L/D alcanza el valor máximo por defecto ($L/D = 5$), punto en el cual se muestra la frase “*El valor de L/D ha sido ajustado*”.

Si el parámetro L/D calculado se encuentra dentro del rango que posee el programa, se despliega un dialogo al lado derecho de la casilla correspondiente a dicho valor en la hoja de cálculo que muestra la frase “*El valor de L/D entra en el rango*”. En este caso al presionar el botón “*Ajustar L/D*”, el programa no realiza ningún cambio.

III.5.4.- Adicionales al dimensionamiento del Separador.

La hoja muestra los valores de los principales parámetros involucrados en el dimensionamiento de codos de 90° como internos en la entrada del separador. Los pasos incluidos en el dimensionamiento se encuentran en el Apéndice B.

III.6.- Separador Horizontal Líquido-Vapor con Extractor de Niebla

En esta sección se citan las bases de diseño y el procedimiento de cálculo vinculado con el dimensionamiento de separadores horizontales líquido-vapor con el uso de extractores de niebla.

III.6.1.- Bases de Diseño

Las bases de diseño que fueron seleccionadas para el dimensionamiento de este tipo de separador se mencionan a continuación:

- ▲ El diámetro de partícula D_p por defecto es tomado como 150 *micrones*.
- ▲ La velocidad de la fase vapor U_G , debe ser un valor comprendido entre el 75% y el 100% de la velocidad crítica de dicha fase U_C .
- ▲ Los diámetros comerciales del separador D , van de medio pie en medio pie.

- ▲ Para un diámetro del separador menor o igual a 4 *ft*, la altura correspondiente al nivel bajo de líquido debe ser de 9 *in*.
- ▲ La altura ocupada por la fase vapor H_G es igual al máximo valor entre el 20% del diámetro o 2 *ft*.
- ▲ La longitud del separador L , debe ser mayor o igual que la longitud mínima requerida para que ocurra la separación de las gotas de líquido en la fase vapor L_{MIN} .
- ▲ La relación Longitud-Diámetro del separador L/D debe estar entre 1,5 y 5.

III.6.2.- Procedimiento de cálculo

El procedimiento de diseño utilizado en la elaboración de la hoja de cálculo para este tipo de separador incluye los pasos mencionados a continuación:

Paso 1.- Introducción de los datos mínimos requeridos para llevar a cabo los cálculos del dimensionamiento del separador.

Se siguieron las indicaciones mostradas en el Paso No. 1, del Apartado III.1.2., excepto que en este caso se requiere adicionalmente un valor inicial estimado para la relación longitud-diámetro del separador L/D , el cual debe ser un valor entre 1,5 y 5; y por el contrario no se necesita conocer el valor del diámetro de partícula D_P .

Paso 2.- Determinación de la densidad de la fase gas.

Ver indicaciones del Paso No. 2, del Apartado III.1.2.

Paso 3.- Determinación del flujo volumétrico de vapor a las condiciones actuales.

Ver indicaciones del Paso No. 3, del Apartado III.1.2.

Paso 4.- Determinación de la velocidad de vapor a partir de su velocidad crítica.

Ver indicaciones del Paso No. 4, del Apartado III.2.2.

Paso 5.- Determinación del volumen de almacenamiento o volumen de Holdup.

Ver indicaciones del Paso No. 6, del Apartado III.1.2.

Paso 6.- Determinación del volumen de oleaje o volumen de Surge.

Ver indicaciones del Paso No. 7, del Apartado III.1.2.

Paso 7.- Determinación del diámetro del recipiente.

Ver indicaciones del Paso No. 7, del Apartado III.5.2.

Paso 8.- Determinación del área de la sección transversal del separador

Ver indicaciones del Paso No. 8, del Apartado III.5.2.

Paso 9.- Selección de la altura de líquido desde la línea tangente inferior del separador hasta el nivel bajo.

Ver indicaciones del Paso No. 9, del Apartado III.5.2.

Paso 10.- Determinación del área correspondiente al ocupado por el nivel bajo de líquido.

Ver indicaciones del Paso No. 10, del Apartado III.5.2.

Paso 11.- Determinación de la altura ocupada por la fase vapor.

Esta altura se determinó a través de la ecuación 80. Este valor se comparó con 2 ft , y se tomó el mayor valor entre ambos como resultado de H_G .

Paso 12.- Determinación del área ocupado por la fase vapor.

Ver indicaciones del Paso No. 12, del Apartado III.5.2.

Paso 13.- Determinación de la longitud del separador.

Ver indicaciones del Paso No. 13, del Apartado III.5.2.

Paso 14.- Determinación del tiempo requerido para la separación de las gotas de líquido de la fase vapor

Ver indicaciones del Paso No. 14, del Apartado III.5.2.

Paso 15.- Determinación de la velocidad actual de vapor

Ver indicaciones del Paso No. 15, del Apartado III.5.2.

Paso 16.- Determinación de la longitud mínima requerida para la separación líquido-vapor

Ver indicaciones del Paso No. 16, del Apartado III.5.2.

Paso 17.- Determinación del área transversal correspondiente al nivel normal de líquido

Ver indicaciones del Paso No. 17, del Apartado III.5.2.

Paso 18.- Determinación de la altura correspondiente al nivel normal de líquido

Ver indicaciones del Paso No. 18, del Apartado III.5.2.

Paso 19.- Determinación de la altura correspondiente al nivel alto de líquido

Ver indicaciones del Paso No. 19, del Apartado III.5.2.

La figura 13 muestra las principales dimensiones de este separador:

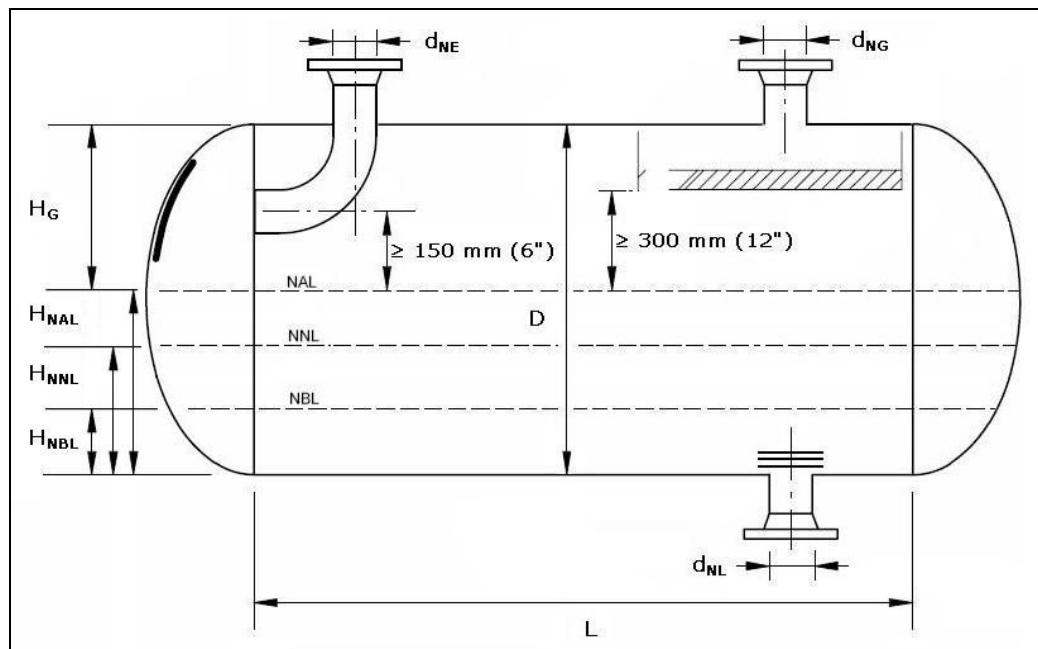


Figura 13. Esquema de un separador bifásico horizontal líquido-vapor con eliminador de niebla tipo malla.

III.6.3.- Procedimientos de Ajuste

Se aplicó el procedimiento expresado en el Apartado III.5.3.

III.6.4.- Adicionales al dimensionamiento del Separador.

Ver Apartado III.5.4.

III.7.- Separador Horizontal Líquido-Líquido

En esta sección se citan las bases de diseño tomadas en cuenta en los procedimientos de cálculo vinculados con el dimensionamiento de separadores horizontales líquido-líquido.

III.7.1.- Bases de Diseño

Las bases de diseño que fueron seleccionadas para el dimensionamiento de este tipo de separador se mencionan a continuación:

- ▲ El diámetro de partícula D_p por defecto es tomado como 150 *micrones*.
- ▲ La velocidad de separación máxima recomendada para ambas fases U_{ALI} y U_{ALh} , es de 10 in/min.
- ▲ Los diámetros comerciales del separador D , van de medio pie en medio pie.
- ▲ La altura mínima recomendada para ambas fases H_{LI} y H_{Lh} es de 1 ft.
- ▲ Los tiempos de Residencia de ambas fases (θ_{LI} y θ_{Lh}), deben ser mayores a los tiempos de separación respectivamente (t_{LI} y t_{Lh}).

III.7.2.- Procedimiento de cálculo

El procedimiento de diseño utilizado en la elaboración de la hoja de cálculo para este tipo de separador incluye los pasos mencionados a continuación:

Paso 1.- Introducción de los datos mínimos requeridos para llevar a cabo los cálculos del dimensionamiento del separador.

Se requieren conocer algunos datos sobre la operación del separador y las condiciones de las fases involucradas, tales como:

- ▲ Presión de operación **P**, la cual es requerida en la unidad *psig*. Posteriormente el programa realiza el cambio a la unidad *psia* mediante la ecuación 50.
- ▲ Temperatura de operación **T**, la cual es requerida en la unidad $^{\circ}F$. Posteriormente el programa realiza el cambio a la unidad $^{\circ}R$ mediante la ecuación 51.
- ▲ Relación asumida de Longitud-Diámetro del separador **L/D**. Debe ser un valor entre 1,5 y 5.
- ▲ Constante de la ley de Stokes **K_S** en ($\text{in} \cdot \text{cP} \cdot \text{ft}^3/\text{lb} \cdot \text{min}$), la cual puede ser introducida de dos formas:
 - ✓ Puede introducirse el menor diámetro de partícula de líquido que se encuentra suspendida en la otra fase líquida, **D_P**. Con esto el programa halla el valor de la constante **K_S** mediante la ecuación 12.
 - ✓ Puede introducirse las dos fases que se van a separar, para las cuales se tengan valores típicos de **K_S** tabulados. La hoja de cálculo cuenta con 7 ejemplos o casos de pares de compuestos líquidos a separar, los cuales son mostrados en la tabla 2.

Tabla 2. Valores típicos de **K_S** para la separación Líquido-Líquido. (Monnery and Svrcek, 1994)

Valores Típicos de K_S para la Separación Líquido-Líquido		
Fase Liviana	Fase Pesada	K_S
Hidrocarburos con gravedad específica (s.g.) mayor a 0,85 @60°F	Agua o cáustico	0,333
Hidrocarburos con gravedad específica (s.g.) menor a 0,85 @60°F	Agua o cáustico	0,163
Agua	Furfural	0,163
Metiletilcetona	Agua	0,163
Alcohol sec-Butil	Agua	0,163
Metilisobutilcetona	Agua	0,163
Nonyl Alcohol	Agua	0,163

En el caso particular de la fase líquida liviana se requieren introducir los siguientes datos:

- ▲ Flujo volumétrico Q_{LI} , en barriles por día (BPD). Posteriormente el programa realiza el cambio a ft^3/s mediante la ecuación 52.
- ▲ Viscosidad de la fase liviana μ_{LI} , en cP.
- ▲ Algunos de los siguientes datos de relación directa con la densidad ρ_{LI} :
 - ✓ Densidad de la fase liviana ρ_{LI} , en lb/ft^3 .
 - ✓ Gravedad API de la fase liviana ($^{\circ}API$). El programa realiza el cambio a lb/ft^3 mediante la ecuación 53.
 - ✓ Gravedad específica de la fase liviana **s.g.** El programa realiza el cambio a lb/ft^3 mediante la ecuación 54.

De igual manera se requieren introducir los datos para la fase líquida pesada .

Paso 2.- Determinación del flujo másico de ambas fases

Los cuales se calcularon mediante las siguientes ecuaciones:

$$W_{LI} = Q_{LI} \cdot 3600 \cdot \rho_{LI} \quad (\text{Ec. 88})$$

$$W_{Lh} = Q_{Lh} \cdot 3600 \cdot \rho_{Lh} \quad (\text{Ec. 89})$$

Paso 3.- Determinación de la velocidad de separación de la fase dispersa en la fase continua

Estas velocidades se determinaron a partir de la ecuación 11 con el valor de K_S introducido en el paso No. 1, tanto para el caso donde la fase dispersa es la fase liviana y la fase continua es la pesada, como en el caso contrario. Es recomendable que estas velocidades (U_{ALl} y U_{ALh}), no sean mayores a 10 in/min, por lo que el programa tiene dicha velocidad como valor máximo en ambos casos.

Paso 4.- Determinación del diámetro del recipiente

El cual se determinó a partir de la ecuación 40. Este valor debe ser llevado al siguiente medio pie o valor comercial más próximo.

Paso 5.- Determinación de la longitud del recipiente

Con el valor de L/D asumido por el usuario e introducido como dato inicial y el valor del diámetro del recipiente, se pudo calcular la longitud del mismo mediante la ecuación 41.

Paso 6.- Determinación de las alturas de líquido

Para dicho calculo se emplearon las siguientes ecuaciones:

$$H_{Lh} = \left(\frac{Q_{Lh}}{Q_{Ll} + Q_{Lh}} \right) \cdot D \quad (\text{Ec. 90})$$

$$H_{Ll} = D - H_{Lh} \quad (\text{Ec. 91})$$

Se recomienda como altura mínima de líquido en ambos casos 1 ft. El programa toma este valor por defecto, si se da el caso que la altura sea menor.

Paso 7.- Determinación del tiempo de separación de ambas fases

Calculado a partir de las ecuaciones 23 y 24.

Paso 8.- Determinación del área ocupada por la fase líquida pesada

El área ocupada por la fase pesada en el separador respecto al área total transversal se determinó mediante el procedimiento de longitud de cuerda de una circunferencia (Ver Apéndice C), teniendo como base la relación entre la altura correspondiente a la fase pesada y el diámetro del separador. Esto se aplicó a través de la ecuación C3, partiendo de las siguientes dos ecuaciones:

$$x = \frac{H_{Lh}}{D} \quad (\text{Ec. 92})$$

$$y = \frac{A_{Lh}}{A_T} \quad (\text{Ec. 93})$$

Posteriormente, el área ocupada por la fase pesada fue calculada al despejar A_{Lh} , de la ecuación 93.

Paso 9.- Determinación del área ocupada por la fase líquida liviana

Determinado mediante la siguiente ecuación:

$$A_{Ll} = A_T - A_{Lh} \quad (\text{Ec. 94})$$

Paso 10.- Determinación del tiempo de residencia de ambas fases

El tiempo de permanencia de ambas fases líquidas se determinó a partir de las ecuaciones 19 y 20.

Se debe cumplir que los tiempos de residencia del liquido (fase liviana y pesada) deben ser mayores que los tiempos de separación de las respectivas fases para lograr un diseño eficiente del separador.

En la figura 14 se muestran las principales dimensiones de este tipo de separador.

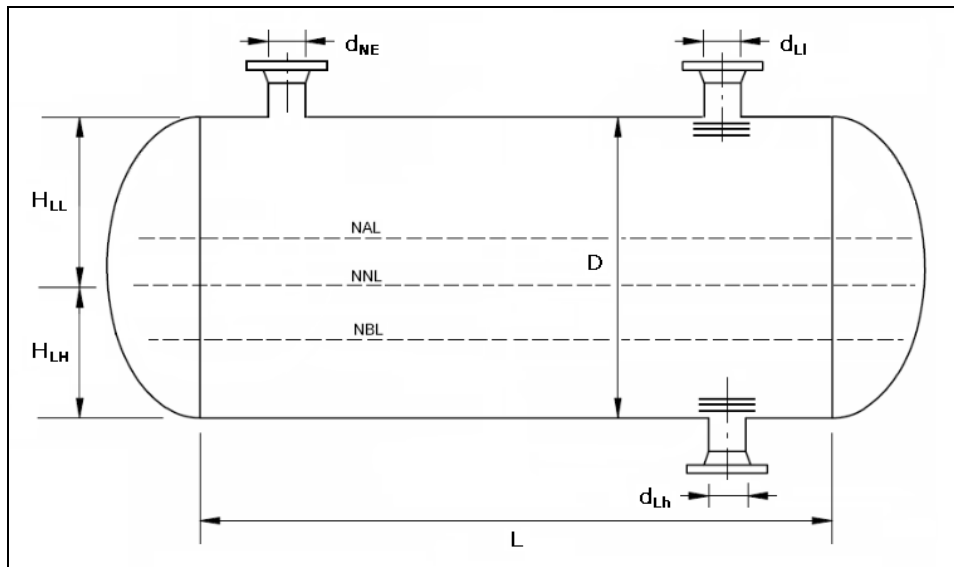


Figura 14. Esquema de un separador bifásico horizontal líquido-líquido.

III.7.3.- Procedimientos de Ajuste

El procedimiento de ajuste que presenta esta hoja de cálculo permite encontrar el menor valor de L/D que cumple con el requisito de que los tiempos de residencia sean mayores que los tiempo de separación para cada fase ($\theta_{Ll} > t_{Ll}$ y $\theta_{Lh} > t_{Lh}$).

Si se da el caso en que alguno de los tiempos de residencia sea menor que el tiempo de separación correspondiente a la misma fase, aparecerá en la hoja de cálculo al lado de la celda del tiempo de residencia la frase “*Se Debe Ajustar la Relación L/D*”. Al usuario apretar el botón “*Ajuste de L/D*”, el programa comenzará a iterar a partir del valor de **L/D** igual a 1,5 incrementando dicho valor en 0,1 hasta que los tiempos de residencia sean iguales o mayores que los tiempos de separación. En este punto aparecerá al lado de la celda de **L/D** la frase “*Valor Optimo de L/D*”.

Si se da el caso en que los tiempos de residencia son mayores a los tiempos de separación y aun no se ha ajustado la hoja, aparecerá en la hoja al lado de la celda de **L/D** la frase “*Puede Optimizar la Relación L/D*”. Esto indica al operador que se puede encontrar un valor más pequeño de **L/D** que cumpla los requerimientos de los tiempos al apretar el botón “*Ajuste de L/D*”. Una vez realizada dicha acción aparecerá la frase “*Valor Optimo de L/D*”. En ambos casos al aparecer dicha frase el ajuste de **L/D** queda inhabilitado.

La hoja también cuenta con el botón “*Eliminar Ajuste de L/D*”, el cual permite al operador eliminar los cambios realizados durante el ajuste.

III.8.- Separador Horizontal Líquido-Líquido-Vapor con Placa

En esta sección se citarán las bases de diseño tomadas en cuenta en los procedimientos de cálculo vinculados con el dimensionamiento de separadores horizontales líquido-líquido-vapor con el uso de placas decantadoras para la separación de las fases líquidas, y de eliminadores de niebla tipo malla.

III.8.1.- Bases de Diseño

Las bases de diseño que fueron seleccionadas para el dimensionamiento de este tipo de separador se mencionan a continuación:

- ▲ El diámetro de partícula **D_P** por defecto es tomado como 150 *micrones*.

- ▲ La velocidad de la fase vapor U_G , debe ser un valor comprendido entre el 75% y el 100% de la velocidad crítica de dicha fase U_C .
- ▲ La velocidad de separación máxima recomendada para ambas fases U_{ALI} y U_{ALh} , es de 10 in/min.
- ▲ Los diámetros comerciales del separador D , van de medio pie en medio pie.
- ▲ La altura de la placa H_W debe ser mayor o igual a 2 *ft*.
- ▲ Para un diámetro del separador D menor o igual a 4 *ft*, la altura del nivel bajo del líquido de la fase liviana H_{NBLI} debe ser de 9 *in*.
- ▲ La altura ocupada por la fase vapor H_G es igual al máximo valor entre el 20% del diámetro o 2 *ft*.
- ▲ La longitud mínima del compartimiento destinado al almacenamiento de los volúmenes de Holdup y Surge de la fase líquida liviana debe ser igual al diámetro de la boquilla de salida de esta fase más 1 *ft*.
- ▲ Tanto el valor de la longitud destinado a la separación líquido-líquido, como el valor de la longitud destinado al almacenamiento de los volúmenes de Holdup y Surge de la fase líquida liviana, deben ser llevados al siguiente medio pie más próximo.
- ▲ La longitud del separador L , debe ser mayor o igual que la longitud mínima requerida para que ocurra la separación de las gotas de líquido en la fase vapor L_{MIN} .
- ▲ La altura mínima recomendada para ambas fases H_{LI} y H_{Lh} es de 1 *ft*, y siempre se calcula como la mitad de la altura de la placa H_W .
- ▲ La relación Longitud-Diámetro del separador L/D debe estar entre 1,5 y 5.

III.8.2.- Procedimiento de cálculo

El procedimiento de diseño utilizado en la elaboración de la hoja de cálculo para este tipo de separador incluye los pasos mencionados a continuación:

Paso 1.- Introducción de los datos mínimos requeridos para llevar a cabo los cálculos del dimensionamiento del separador.

Es requerido conocer algunos datos sobre la operación del separador y las condiciones de las fases involucradas, tales como:

- ▲ Presión de operación **P**, la cual es requerida en la unidad *psig*. Posteriormente el programa realiza el cambio a la unidad *psia* mediante la ecuación 50.
- ▲ Temperatura de operación **T**, la cual es requerida en la unidad $^{\circ}F$. Posteriormente el programa realiza el cambio a la unidad $^{\circ}R$ mediante la ecuación 51.
- ▲ Relación asumida de Longitud-Diámetro del separador **L/D**. Debe ser un valor entre 1,5 y 5.
- ▲ Constante de la ley de Stokes **K_S** en ($\text{in} \cdot \text{cP} \cdot \text{ft}^3/\text{lb} \cdot \text{min}$), la cual puede ser introducida en las formas descritas en el Paso No. 1, del Apartado III.7.2 (Ver Tabla 2).
- ▲ Tiempo de almacenamiento de líquido o Holdup **t_H**, en minutos (min).
- ▲ Tiempo de fluctuación por oleaje o Surge **t_S**, en minutos (min).

En el caso particular de la fase líquida liviana se requieren introducir los siguientes datos:

- ▲ Flujo volumétrico **Q_{LI}**, en barriles por día (*BPD*). Posteriormente el programa hace el cambio a ft^3/s mediante la ecuación 52.
- ▲ Viscosidad de la fase **μ_{LI}**, en cP.
- ▲ Algunos de los siguientes datos de relación directa con la densidad **ρ_{LI}**:
 - ✓ Densidad **ρ_{LI}**, en lb/ft^3 .
 - ✓ Gravedad API ($^{\circ}API$). El programa realiza el cambio a lb/ft^3 mediante la ecuación 53.
 - ✓ Gravedad específica **s.g.** El programa realiza el cambio a lb/ft^3 mediante la ecuación 54.

De igual manera se deben introducir los datos para el caso de la fase líquida pesada .

Para el caso de la fase vapor se requieren introducir los siguientes datos:

- ▲ Flujo volumétrico en condiciones estándares Q_{GS} , en millones de pies cúbicos estándares por día (*MMSCFD*).
- ▲ Peso molecular de la fase PM , en *lb/lb-mol*.
- ▲ Factor de compresibilidad Z .

Paso 2.- Determinación de la densidad de la fase gas.

Ver indicaciones del Paso No. 2, del Apartado III.1.2.

Paso 3.- Determinación del flujo volumétrico de vapor a las condiciones actuales.

Ver indicaciones del Paso No. 3, del Apartado III.1.2.

Paso 4.- Determinación del flujo másico de las tres fases

Las cuales se determinaron para las fases líquidas por las ecuaciones 86 y 87, y para la fase vapor por la siguiente ecuación:

$$W_G = \frac{Q_{GS} \cdot 10^{+6} \cdot PM}{379,49 \cdot 24} \quad (\text{Ec. 95})$$

Paso 5.- Determinación de la velocidad de vapor a partir de su velocidad crítica.

Ver indicaciones del Paso No. 4, del Apartado III.2.2.

Paso 6.- Determinación del volumen de almacenamiento o volumen de Holdup.

Este es el volumen de líquido que se obtuvo mediante la ecuación 18 utilizando el caudal de la fase líquida liviana únicamente.

Paso 7.- Determinación del volumen de oleaje o volumen de Surge.

Este es el volumen de líquido que se obtuvo mediante la ecuación 21 utilizando el caudal de la fase líquida liviana únicamente.

Paso 8.- Determinación del diámetro del recipiente.

Para determinar el diámetro del separador se utilizó la ecuación 42. Este valor debió ser llevado al siguiente medio pie o valor comercial más próximo.

Paso 9.- Determinación del área de la sección transversal del separador

Ver indicaciones del Paso No. 8, del Apartado III.5.2.

Paso 10.- Selección de la altura de líquido desde la línea tangente inferior del separador hasta el nivel bajo.

Ver indicaciones del Paso No. 9, del Apartado III.5.2.

Paso 11.- Determinación del área correspondiente al ocupado por el nivel bajo de líquido.

Ver indicaciones del Paso No. 10, del Apartado III.5.2.

Paso 12.- Determinación de la altura ocupada por la fase vapor.

Esta pudo ser determinada a través de la ecuación 80. Este valor se comparó con 2 *ft*, y se tomó el mayor valor entre ambos como resultado de H_G .

Paso 13.- Determinación del área ocupado por la fase vapor.

Ver indicaciones del Paso No. 12, del Apartado III.5.2.

Paso 14.- Determinación de la altura de la placa.

Calculada mediante la siguiente ecuación:

$$H_w = D - H_G \quad (\text{Ec. 96})$$

La altura de la placa no puede ser menor a 2 *ft*, de ocurrir esto se debe ajustar el diámetro. Ver procedimientos de ajuste, Apartado III.8.3

Paso 15.- Determinación de la longitud mínima del compartimiento destinado al almacenaje de la fase liviana en el separador.

Determinado como la longitud necesaria para almacenar los volúmenes de Holdup y Surge, mediante la ecuación 43, teniéndose como valor mínimo para esta longitud el arrojado por la ecuación 44. El programa toma el mayor valor entre ambas ecuaciones y lo aproxima al medio pie más próximo.

Paso 16.- Determinación de las alturas para las fases líquidas

Estas alturas se determinaron a partir de la altura de la placa, asignándose por recomendación la mitad de este valor a cada fase, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$H_{Li} = H_{Lh} = \frac{H_w}{2} \quad (\text{Ec. 97})$$

Paso 17.- Determinación del área ocupada por la fase líquida pesada

Ver indicaciones del Paso No. 8, del Apartado III.7.2.

Paso 18.- Determinación del área ocupada por la fase líquida liviana

Pudo ser obtenida a partir de la siguiente ecuación:

$$A_{Li} = A_T - A_G - A_{Lh} \quad (\text{Ec. 98})$$

Paso 19.- Determinación de la velocidad de separación de la fase líquida dispersa en la fase líquida continua

Estas velocidades fueron calculadas a partir de la ecuación 11 con el valor de K_S introducido en el paso No. 1, tanto para el caso donde la fase dispersa es la fase liviana y la fase continua es la pesada, como en el caso contrario. Es recomendable que estas velocidades (U_{ALI} y U_{ALh}), no sean mayores a 10 in/min, por lo que el programa tomó dicho valor como velocidad máxima en ambos casos.

Paso 20.- Determinación del tiempo de separación de ambas fases

Ver indicaciones del Paso No. 7, del Apartado III.7.2.

Paso 21.- Determinación de la longitud mínima para que ocurra la separación líquido-líquido

Esta longitud fue determinada como el máximo resultado entre las ecuaciones 45 y 46. Este valor se aproximó al siguiente medio pie más cercano.

Paso 22.- Determinación de la longitud total del separador

La longitud del separador fue determinada como la suma de la longitud destinada a la separación de las fases líquidas y la longitud destinada al almacenamiento de los volúmenes de Holdup y Surge de la fase líquida liviana. Esta fue calculada a partir de la ecuación 47.

Paso 23.- Determinación del tiempo requerido para la separación de las gotas de líquido de la fase vapor

Ver indicaciones del Paso No. 14, del Apartado III.5.2.

Paso 24.- Determinación de la velocidad actual de vapor

Ver indicaciones del Paso No. 15, del Apartado III.5.2.

Paso 25.- Determinación de la longitud mínima requerida para la separación líquido-vapor

Esta longitud pudo ser obtenida a partir de la ecuación 38, siendo un requisito para el buen dimensionamiento del separador el que su resultado sea menor o igual que la longitud mínima del separador (ver el procedimiento de ajuste, Apartado III.8.3).

En la figura 15 se muestran las principales dimensiones de este tipo de separador.

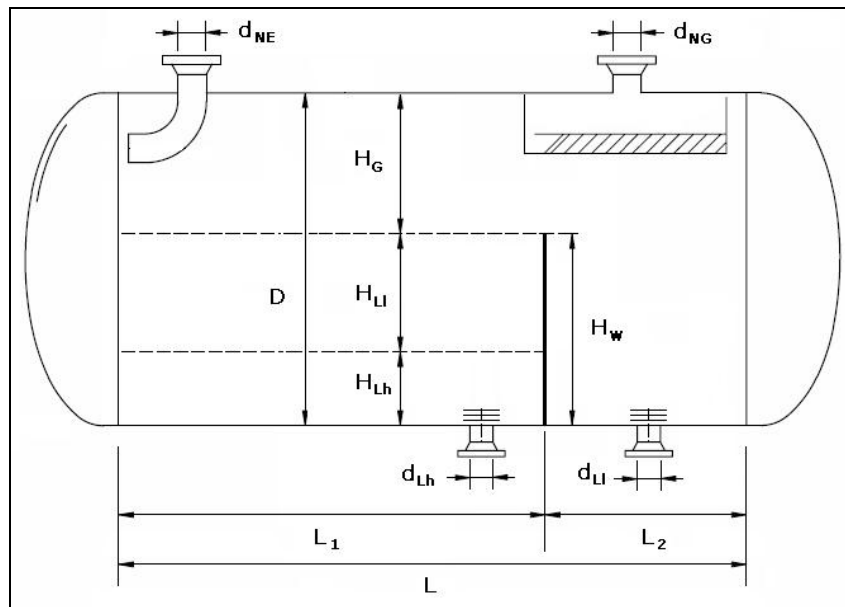


Figura 15. Esquema de un separador trifásico horizontal líquido-líquido-vapor con placa decantadora.

III.8.3.- Procedimientos de Ajuste

La hoja de cálculo presenta tres botones destinados al ajuste de tres parámetros de diseño, los cuales deben ejecutarse en el siguiente orden: ajuste de la altura de la placa H_W , ajuste de la longitud del separador L , y ajuste de la relación Longitud-Diámetro del separador L/D . De igual manera presenta tres botones que eliminan los cambios realizados durante cada uno de los ajustes.

a) Ajuste de la altura de la placa (H_W):

La altura de la placa H_W , debe ser como mínimo de 2 ft. Si se da el caso en que sea menor que este valor, aparecerá la frase “Se debe ajustar H_W ” en la hoja de cálculo al lado de la casilla destinada a dicha altura, lo que le indica al usuario que debe apretar el botón “Ajustar H_W ”. Al ejecutar este botón el programa irá incrementando el valor del diámetro hasta que la altura de la placa sea igual a 2 ft, punto en el cual se mostrará la frase “El valor de H_W ha sido ajustado”.

Si se da el caso en que la altura de la palca sea mayor o igual a 2 ft, entonces la hoja mostrará la frase “*El valor de H_W entra en el rango*”. En este caso el botón “*Ajustar H_W* ” queda deshabilitado.

b) Ajuste de la longitud del separador (L):

El ajuste de la longitud del separador L , se realiza en función del valor de la longitud mínima requerida para que se logre la separación de las fases L_{MIN} . Para que el diseño del separador horizontal sea adecuado la longitud del separador debe ser mayor o igual a la longitud mínima requerida para que se logre la separación de las gotas de líquido suspendidas en la fase vapor.

Si el valor correspondiente a la longitud mínima requerida para que ocurra la separación L_{MIN} , es mayor que el valor correspondiente a la longitud del separador L , en un 20% o más del valor de L ($L_{MIN} > 1,2 * L$), aparecerá en la hoja de cálculo al lado de la casilla correspondiente al resultado de la variable L_{MIN} , la frase “*Se debe ajustar el valor de L*”. Esta frase le indica al usuario que debe apretar el botón “*Ajustar L*”, con lo cual el programa irá incrementando el valor mínimo de la altura del separador ocupada por la fase vapor H_G , ocasionando así una disminución de la altura destinada al almacenamiento de los volúmenes de líquido (V_H y V_S), y un aumento de la longitud del separador L para que puedan ser almacenados dichos volúmenes. Una vez que el valor de L_{MIN} sea mayor que el valor de L en menos de un 20% ($L_{MIN} > L$ y $L_{MIN} < 1,2 * L$), el programa igualará el valor de la longitud del separador al valor de la longitud mínima de separación ($L = L_{MIN}$), punto en el cual aparecerá la frase “*El valor de L ha sido ajustado*”.

Si por el contrario el valor de L es mayor al valor de L_{MIN} , aparecerá en la hoja la frase “*El valor de L entra en el rango*”, esto le indica al usuario que las dimensiones del separador son adecuadas para que ocurra la separación de las fases. En este punto el botón “*Ajuste de L*” queda inhabilitado.

c) Ajuste de la relación Longitud-Diámetro del separador (L/D):

El ajuste de la relación Longitud-Diámetro del separador **L/D**, se realiza en función de un rango interno en el programa el cual limita este valor de relación entre 1,5 y 5. Si el parámetro **L/D** calculado es menor a 1,5 se desplegará un dialogo al lado de la casilla correspondiente a dicho valor en la hoja de cálculo que mostrará la frase “*Se debe ajustar el valor de L/D*”. En este caso al presionar el botón “*Ajustar L/D*”, el programa irá incrementando el valor de **L/D** asumido por el usuario e introducido como dato inicial, siempre y cuando este sea menor que 5. Con el incremento del valor de **L/D** asumido, el valor del diámetro calculado disminuye, disminuyendo los valores de las alturas destinadas al almacenamiento de los volúmenes de líquido y por ende aumenta la longitud requerida del separador. Este proceso se repite hasta que la relación **L/D** calculada alcance el valor mínimo por defecto ($L/D = 1,5$), punto en el cual se mostrará la frase “*El valor de L/D ha sido ajustado*”.

Si el parámetro **L/D** calculado es mayor a 5 se desplegará un dialogo al lado de la casilla correspondiente a dicho valor en la hoja de cálculo que mostrará la frase “*Se debe ajustar el valor de L/D*”. En este caso al presionar el botón “*Ajustar L/D*”, el programa irá incrementando el valor del diámetro del separador **D**, hasta que la relación **L/D** alcance el valor máximo por defecto ($L/D = 5$), punto en el cual se mostrará la frase “*El valor de L/D ha sido ajustado*”.

Si el parámetro **L/D** calculado se encuentra dentro del rango que posee el programa, se desplegará un dialogo al lado de la casilla correspondiente a dicho valor en la hoja de cálculo que mostrará la frase “*El valor de L/D entra en el rango*”. En este caso al presionar el botón “*Ajustar L/D*”, el programa no realizará ningún cambio.

III.9.- Separador Horizontal Líquido-Líquido-Vapor con Bota

En esta sección se citarán las bases de diseño tomadas en cuenta en los procedimientos de cálculo vinculados con el dimensionamiento de separadores horizontales líquido-líquido-vapor con el uso de bota para almacenar la fase líquida pesada, y de eliminadores de niebla tipo malla.

III.9.1.- Bases de Diseño

Las bases de diseño que fueron seleccionadas para el dimensionamiento de este tipo de separador se mencionan a continuación:

- ▲ El diámetro de partícula D_P por defecto es tomado como 150 *micrones*.
- ▲ La velocidad de la fase vapor U_G , debe ser un valor comprendido entre el 75% y el 100% de la velocidad crítica de dicha fase U_C .
- ▲ La velocidad de separación máxima recomendada para ambas fases U_{ALI} y U_{ALh} , es de 10 in/min.
- ▲ El diámetro comercial del separador D , debe ir de medio pie en medio pie.
- ▲ La altura ocupada por la fase vapor H_G debe ser igual al máximo valor entre el 20% del diámetro o 2 *ft*.
- ▲ La longitud del separador L , debe ser llevados al siguiente medio pie más próximo.
- ▲ La longitud del separador L , debe ser mayor o igual que la longitud mínima requerida para que ocurra la separación de las gotas de líquido en la fase vapor L_{MIN} .
- ▲ La altura mínima recomendada para la fase líquida liviana en el separador y en la bota (H_{LIS} y H_{LIB}) es de 1 *ft* y 0,5 *ft* respectivamente.
- ▲ La altura mínima recomendada para la fase líquida pesada en la bota del separador H_{LhB} es de 2 *ft*.
- ▲ El tiempo de residencia de la fase líquida liviana en el separador θ_{LI} debe ser mayor o igual al tiempo de separación de la fase líquida pesada dispersa en la fase líquida liviana t_{Lh} .

- ▲ El tiempo de residencia de la fase líquida pesada en la bota θ_{Lh} debe ser mayor o igual al tiempo de separación de la fase líquida liviana dispersa en la fase líquida pesada t_{LI} .
- ▲ El diámetro comercial de la bota en el separador D_B , irán de medio pie en medio pie.
- ▲ La velocidad del fluido en la bota U_B será igual al 75% de la velocidad de separación de la fase líquida liviana dispersa en la fase líquida pesada U_{ALL} .
- ▲ La relación Longitud-Diámetro del separador L/D debe estar entre 1,5 y 5.

III.9.2.- Procedimiento de cálculo

El procedimiento de diseño utilizado en la elaboración de la hoja de cálculo para este tipo de separador incluye los pasos mencionados a continuación:

Paso 1.- Introducción de los datos mínimos requeridos para llevar a cabo los cálculos del dimensionamiento del separador.

Se siguieron las indicaciones mostradas en el Paso No. 1, del Apartado III.8.2.

Adicionalmente, se dio la opción de introducir los valores para las alturas correspondientes a la fase liviana en el separador H_{LIS} , fase liviana en la bota H_{LIB} , y fase pesada en la bota H_{LhB} , o dejar los valores mínimos recomendados en la bibliografía (ver Apartado III.8.1). La opción para introducir los datos de forma particular o por defecto se da a lo largo de la hoja de cálculo mediante botones ubicados al lado de las casillas de dichas variables.

Paso 2.- Determinación de la densidad de la fase gas.

Ver indicaciones del Paso No. 2, del Apartado III.1.2.

Paso 3.- Determinación del flujo volumétrico de vapor a las condiciones actuales.

Ver indicaciones del Paso No. 3, del Apartado III.1.2.

Paso 4.- Determinación del flujo másico de las tres fases

Ver indicaciones del Paso No. 4, del Apartado III.8.2.

Paso 5.- Determinación de la velocidad de vapor a partir de su velocidad crítica.

Ver indicaciones del Paso No. 4, del Apartado III.2.2.

Paso 6.- Determinación del volumen de almacenamiento o volumen de Holdup.

Este es el volumen de líquido se obtiene mediante la ecuación 18 utilizando el caudal de la fase líquida liviana únicamente.

Paso 7.- Determinación del volumen de oleaje o volumen de Surge.

Este es el volumen de líquido se obtiene mediante la ecuación 21 utilizando el caudal de la fase líquida liviana únicamente.

Paso 8.- Determinación del diámetro del recipiente.

Ver indicaciones del Paso No. 7, del Apartado III.5.2.

Paso 9.- Determinación del área de la sección transversal del separador

Ver indicaciones del Paso No. 8, del Apartado III.5.2.

Paso 10.- Determinación de la altura ocupada por la fase vapor.

Esta pudo ser determinada a través de la ecuación 80. Este valor se comparó con $2 ft$, y se tomó el mayor valor entre ambos como resultado de H_G .

Paso 11.- Determinación del área ocupado por la fase vapor.

Ver indicaciones del Paso No. 12, del Apartado III.5.2.

Paso 12.- Selección de la altura correspondiente a la fase líquida liviana tanto en el separador como en la bota.

Mediante el uso de botones se dio la opción de introducir para cada una de las alturas (H_{LIS} y H_{LIB}) un valor establecido por el usuario o un valor mínimo recomendado, el cual se encuentra incluido en el programa.

Paso 13.- Determinación del área ocupada por la fase líquida liviana en el separador

El área ocupada por la fase liviana en el separador respecto al área total transversal pudo ser determinada mediante el procedimiento de longitud de cuerda de una circunferencia (ver Apéndice C), teniendo como base la relación entre la altura correspondiente a la fase liviana y el diámetro del separador. Esto se aplicó a través de la ecuación C3, partiendo de las siguientes dos ecuaciones:

$$x = \frac{H_{LIS}}{D} \quad (\text{Ec. 99})$$

$$y = \frac{A_{LIS}}{A_T} \quad (\text{Ec. 100})$$

Posteriormente, el área ocupada por la fase pesada se calculó al despejar A_{LIS} , de la ecuación 100.

Paso 14.- Determinación de la longitud del separador.

Se determinó como la longitud necesaria para almacenar los volúmenes de Holdup y Surge, mediante la ecuación 48. El programa aproxima el valor de longitud al siguiente medio pie más próximo.

Paso 15.- Determinación del tiempo requerido para la separación de las gotas de líquido de la fase vapor

Ver indicaciones del Paso No. 14, del Apartado III.5.2.

Paso 16.- Determinación de la velocidad actual de vapor

Ver indicaciones del Paso No. 15, del Apartado III.5.2.

Paso 17.- Determinación de la longitud mínima requerida para la separación líquido-vapor

Esta longitud pudo ser obtenida a partir de la ecuación 38, siendo un requisito para el buen dimensionamiento del separador el que su resultado sea menor o igual que la longitud mínima del separador (ver el procedimiento de ajuste, Apartado III.9.3).

Paso 18.- Determinación de la velocidad de separación de la fase líquida pesada dispersa en la fase líquida liviana

Esta velocidad fue calculada a partir de la ecuación 11 con el valor de K_S introducido en el paso No. 1, para el caso donde la fase dispersa es la fase líquida pesada y la fase continua es la fase líquida liviana. Es recomendable que esta velocidad (U_{ALh}), no sea mayor a 10 in/min, por lo que el programa tiene incluido dicho valor máximo.

Paso 19.- Determinación del tiempo de separación de la fase líquida pesada dispersa en la fase líquida liviana

Pudo ser calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$t_{Lh} = 12 \cdot \frac{(H_{LIB} + D - H_G)}{U_{ALh}} \quad (\text{Ec. 101})$$

Paso 20.- Determinación del tiempo de residencia de la fase líquida liviana en el separador

El tiempo de permanencia de la fase líquida en el separador pudo ser determinado a partir de la siguiente ecuación:

$$\theta_{LI} = \frac{(A_T - A_G) \cdot L}{Q_{LI} \cdot 60} \quad (\text{Ec. 102})$$

Paso 21.- Rectificación de la longitud del separador

Si el tiempo de residencia de la fase líquida liviana es menor que el tiempo de separación de la fase líquida pesada, se debe recalcular la longitud del separador utilizando dicho tiempo de separación, a través de la ecuación 49.

La hoja de cálculo incluyó las ecuaciones 48 y 49 dentro del cálculo de la longitud del separador, ajustando el parámetro si se diera el caso citado en este paso.

Paso 22.- Selección de la altura correspondiente a la fase líquida pesada en la bota del separador.

Mediante el uso de botones se dio la opción de introducir un valor para la altura ocupada por la fase líquida pesada en la bota H_{LhB} , bien sea establecido por el usuario o un valor mínimo recomendado, el cual se encuentra incluido en el programa como defecto.

Paso 23.- Determinación de la velocidad de separación de la fase líquida liviana dispersa en la fase líquida pesada

Esta velocidad fue calculada a partir de la ecuación 11 con el valor de K_S introducido en el paso No. 1, para el caso donde la fase dispersa es la fase líquida liviana y la fase continua es la fase líquida pesada. Es recomendable que esta velocidad (U_{ALI}), no sea mayor a 10 in/min, por lo que el programa incluyó dicho valor como máximo.

Paso 24.- Determinación del tiempo de separación de la fase líquida liviana dispersa en la fase líquida pesada

Pudo ser calculada a partir de la ecuación 23.

Paso 25.- Determinación del diámetro de la bota

Según recomendaciones la velocidad de fluido en la bota debe ser igual al 75% de la velocidad de separación de la fase líquida liviana dispersa en la fase líquida pesada. Esto se aplicó en el programa mediante la siguiente ecuación:

$$U_B = 0,75 \cdot U_{ALI} \quad (\text{Ec. 103})$$

Con el valor de la velocidad en la bota se pudo calcular el diámetro de dicho recipiente mediante la siguiente ecuación:

$$D_B = \sqrt{\frac{4 \cdot 12 \cdot 60 \cdot Q_{LI}}{\pi \cdot U_B}} \quad (\text{Ec. 104})$$

Paso 26.- Determinación del tiempo de residencia de la fase líquida pesada en la bota

El tiempo de permanencia de la fase líquida pesada en la bota pudo ser determinado a partir de la siguiente ecuación:

$$\theta_{Lh} = \frac{\pi \cdot D_B^2 \cdot H_{LhB}}{4 \cdot Q_{Lh} \cdot 60} \quad (\text{Ec. 105})$$

El tiempo de residencia debe ser mayor al tiempo de separación de la fase líquida pesada. Para mayor detalle, ver el procedimiento de ajuste, apartado III.9.3

La figura 16 muestra las principales dimensiones de este tipo de separador.

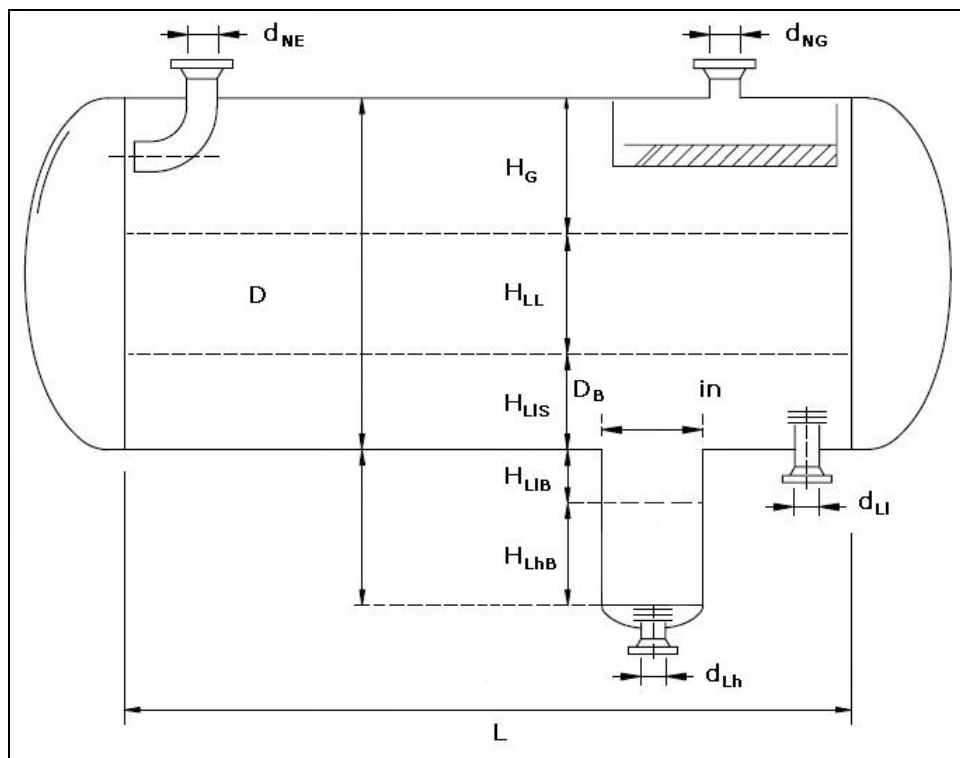


Figura 16. Esquema de un separador trifásico horizontal líquido-líquido-vapor con bota.

III.9.3.- Procedimientos de Ajuste

La hoja de cálculo presenta tres ajustes, los cuales de ser requeridos realizar deben ejecutarse en el siguiente orden: Ajuste de longitud del separador (**L**), Ajuste de la relación longitud-diámetro del separador (**L/D**), ajuste del diámetro de la bota (**D_B**). También cuenta con otros tres botones que eliminan los cambios realizados durante el ajuste.

a) Ajuste de la longitud del separador (**L**):

El ajuste de la longitud del separador **L**, se realiza en función del valor de la longitud mínima requerida para que se logre la separación de las fases **L_{MIN}**. Para que el diseño del separador horizontal sea adecuado la longitud del separador debe ser mayor o igual a la longitud mínima requerida para que se logre la separación de las gotas de líquido suspendidas en la fase vapor.

Si el valor correspondiente a la longitud mínima requerida para que ocurra la separación **L_{MIN}**, es mayor que el valor correspondiente a la longitud del separador **L**, en un 20% o más del valor de **L** ($L_{MIN} > 1,2 * L$), aparecerá en la hoja de cálculo al lado de la casilla correspondiente al resultado de la variable **L_{MIN}**, la frase “*Se debe ajustar el valor de L*”. Esta frase le indica al usuario que debe apretar el botón “*Ajustar L*”, con lo cual el programa irá incrementando el valor mínimo de la altura del separador ocupada por la fase vapor **H_G**, ocasionando así una disminución de la altura destinada al almacenamiento de los volúmenes de líquido (**V_H** y **V_S**), y un aumento de la longitud del separador **L** para que puedan ser almacenados dichos volúmenes. Una vez que el valor de **L_{MIN}** sea mayor que el valor de **L** en menos de un 20% ($L_{MIN} > L$ y $L_{MIN} < 1,2 * L$), el programa igualará el valor de la longitud del separador al valor de la longitud mínima de separación ($L = L_{MIN}$), punto en el cual aparecerá la frase “*El valor de L ha sido ajustado*”.

Si por el contrario el valor de L es mayor al valor de L_{MIN} , aparecerá en la hoja la frase “*El valor de L entra en el rango*”, esto le indica al usuario que las dimensiones del separador son adecuadas para que ocurra la separación de las fases. En este punto el botón “*Ajuste de L* ” queda inhabilitado.

b) Ajuste de la relación Longitud-Diámetro del separador (L/D):

El ajuste de la relación Longitud-Diámetro del separador L/D , se realiza en función de un rango interno en el programa el cual limita este valor de relación entre 1,5 y 5. Si el parámetro L/D calculado es menor a 1,5 se desplegará un dialogo al lado de la casilla correspondiente a dicho valor en la hoja de cálculo que mostrará la frase “*Se debe ajustar el valor de L/D* ”. En este caso al presionar el botón “*Ajustar L/D* ”, el programa irá incrementando el valor de L/D asumido por el usuario e introducido como dato inicial, siempre y cuando este sea menor que 5. Con el incremento del valor de L/D asumido, el valor del diámetro calculado disminuye, disminuyendo los valores de las alturas destinadas al almacenamiento de los volúmenes de líquido y por ende aumenta la longitud requerida del separador. Este proceso se repite hasta que la relación L/D calculada alcance el valor mínimo por defecto ($L/D = 1,5$), punto en el cual se mostrará la frase “*El valor de L/D ha sido ajustado*”.

Si el parámetro L/D calculado es mayor a 5 se desplegará un dialogo al lado de la casilla correspondiente a dicho valor en la hoja de cálculo que mostrará la frase “*Se debe ajustar el valor de L/D* ”. En este caso al presionar el botón “*Ajustar L/D* ”, el programa irá incrementando el valor del diámetro del separador D , hasta que la relación L/D alcance el valor máximo por defecto ($L/D = 5$), punto en el cual se mostrará la frase “*El valor de L/D ha sido ajustado*”.

Si el parámetro L/D calculado se encuentra dentro del rango que posee el programa, se desplegará un dialogo al lado de la casilla correspondiente a dicho valor en la hoja de cálculo que mostrará la frase “*El valor de L/D entra en el rango*”. En este caso al presionar el botón “*Ajustar L/D* ”, el programa no realizará ningún cambio.

c) Ajuste del diámetro de la bota del separador (DB):

El diámetro de la bota del separador debe ser tal que dada una altura de la fase pesada en dicho recipiente, debe cumplir con que el flujo volumétrico de la fase pesada tenga un tiempo de permanencia θ_{Lh} mayor al tiempo que tarda la fase liviana en separarse de la fase pesada t_{LI} . Dado el caso en que el tiempo de residencia sea menor que el tiempo de separación de la fase líquida liviana ($\theta_{Lh} < t_{LI}$), aparecerá la frase “*Se debe ajustar el diámetro de la bota*” al lado de la casilla correspondiente al parámetro θ_{Lh} , lo cual le indica al usuario que debe apretar el botón “*Ajustar DB*”, con lo cual el programa irá incrementando el diámetro de la bota hasta que el tiempo de residencia sea igual o mayor que el tiempo de separación. Una vez ajustado el diámetro aparecerá la frase “*El diámetro de la bota ha sido ajustado*”.

Si se da el caso en que el tiempo de residencia de la fase líquida pesada sea mayor o igual al tiempo de separación de la fase líquida liviana, aparecerá la frase “*El valor del diámetro de bota es correcto*”. En este punto el botón “*Ajustar DB*” queda inhabilitado.

CAPÍTULO IV: Resultados

Los resultados del presente estudio están enfocados en la elaboración de un programa conformado por un compendio de hojas de cálculo elaboradas en Microsoft Excel, ajustadas e interconectadas mediante algoritmos programados bajo el lenguaje Visual Basic for Applications.

En tal sentido, se clasificarán los resultados obtenidos en cuatro etapas:

- ▲ Obtención del programa.
- ▲ Validación de los resultados obtenidos a través de las hojas de cálculo.
- ▲ Aplicación del programa
- ▲ Limitaciones del programa

IV.1.- Características del Programa

En esta sección se describirán los aspectos más importantes que caracterizan el programa.

IV.1.1.- Interfase Visual Basic.

El programa contiene una portada (Figura No. 17) y un índice de aplicación el cual permite seleccionar que tipo de separador se desea dimensionar (Figura No. 18). Mediante este índice el programa ubicará y dispondrá la hoja de cálculo requerida para llevar a cabo el dimensionamiento del separador seleccionado, a partir de un compendio de hojas que describen el procedimiento de cálculo de cada uno de los separadores tomados en cuenta para la realización del presente trabajo, los cuales son expuestos en la metodología (Ver Capítulo III). Adicionalmente, el programa cuenta con otras dos interfases, la primera permite introducir los datos requeridos para llevar a cabo el diseño de cada tipo de separador trasladándolos a la respectiva hoja de cálculo (Figura No. 19), y la segunda muestra a partir de los resultados elaborados en la hoja de Excel un esquema donde aparecen las principales dimensiones del separador (Figura No. 20).



Figura 17. Pantalla de presentación del programa.

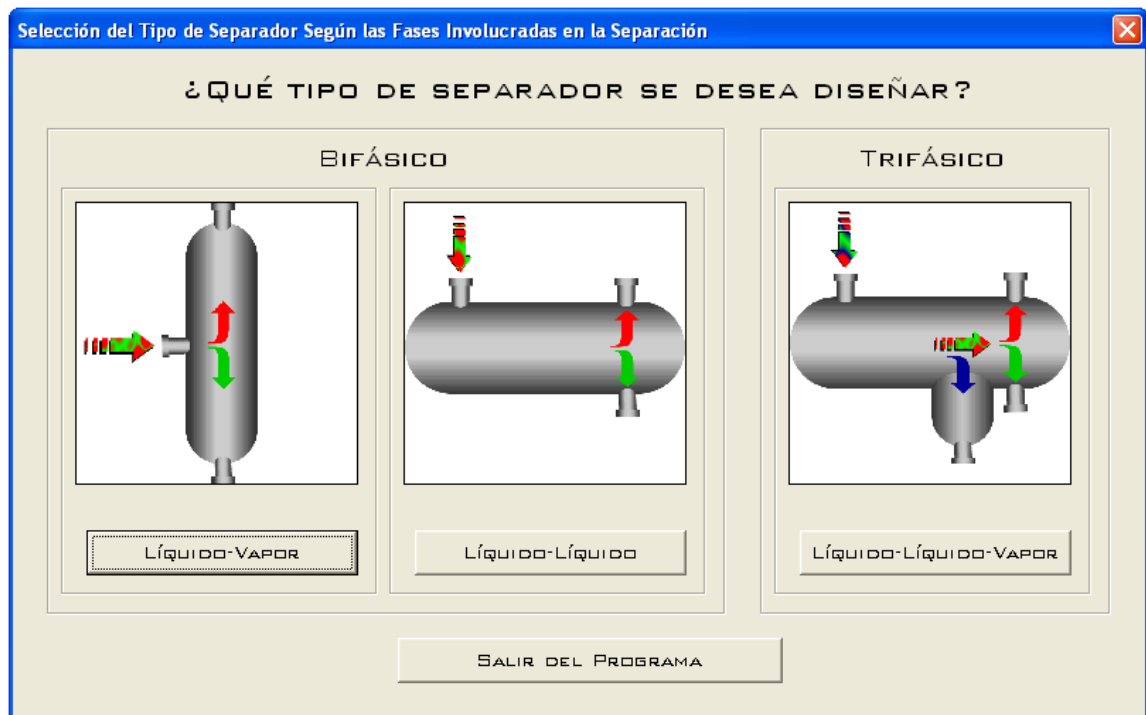
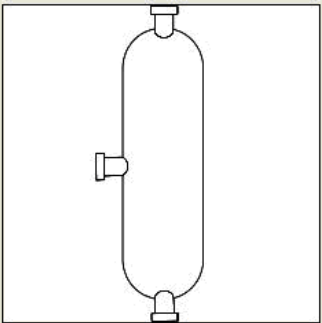


Figura 18. Pantalla de Selección del Tipo de Separador según las Fases a Separar.

Selección del Tipo de Separador Bifásico Líquido-Vapor e Introducción de los Datos Iniciales para el Diseño

Vertical con Paquete de Vena en 2 Etapas Vertical sin Eliminador de Niebla	Horizontal sin Eliminador de Niebla Vertical con Malla Eliminadora de Niebla	Horizontal con Malla Eliminadora de Niebla Vertical con Paquete de Vena en 1 Etapa
---	---	---

ESQUEMA



DATOS GENERALES

Presión de Operación (P) psig

Temperatura de Operación (T) °F

Diámetro de Partícula (D_p) micrones

Tiempo de Holdup (t_H) min

Tiempo de Surge (t_S) min

¿Desea obtener el diseño de algún interno a la entrada del separador?

Tensión Superficial de la Fase Líquida (σ) dinas/cm

FASE VAPOR

Flujo Volumétrico a Cond. Estándares (Q_{GS}) MMSCFD

Peso Molecular (PM) lb/lb-mol

Factor de Compresibilidad (z)

Viscosidad (μ_G) cP

FASE LÍQUIDA

Flujo Volumétrico (Q_L) BPD

Densidad (ρ_L) lb/ft³

Gravedad API (°API) °API

Gravedad Específica (s.g)

Figura 19. Pantalla de Selección de la Disposición del Separador e Introducción de los Datos Iniciales para su Respectivo Diseño.

IV.1.2.- Hojas de Cálculo.

Aunque los fundamentos de la separación de fases están basados en las leyes de Newton y de Stoke, cada tipo de separador tiene una metodología de diseño en particular, las cuales se encuentran desarrolladas y dispuestas en hojas de cálculo específicas para cada tipo de recipiente. En este sentido, el programa constará de 9 hojas de cálculo específicas para el diseño de cada uno de los 9 tipos de separadores que se presentan en la metodología.

Cada procedimiento de cálculo presenta ajustes de parámetros determinados, los cuales se han realizado mediante la implementación de algoritmos escritos en el

lenguaje Visual Basic for Applications. Estos ajustes son dispuestos dentro de las hojas de cálculo para ser aplicados con la ejecución de botones (Figura 21).

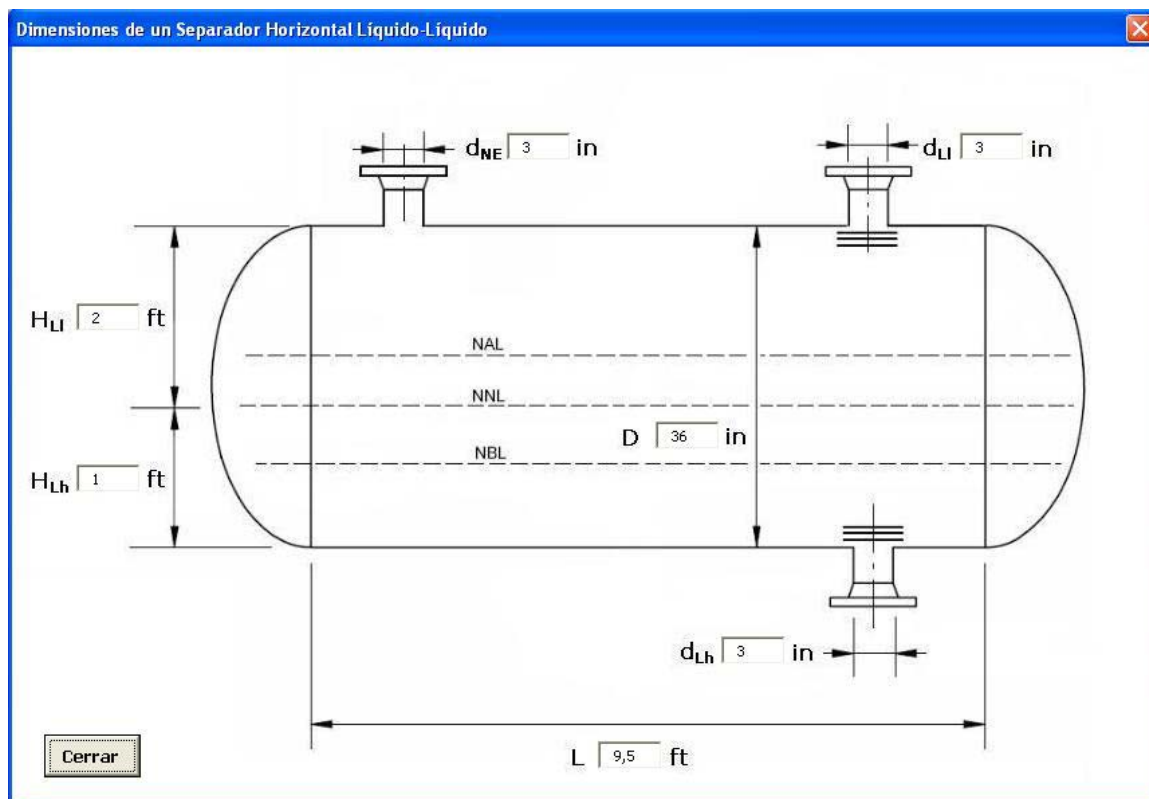


Figura 20. Resultado esquemático del dimensionamiento del separador. (Ejemplo: Separador Bifásico Horizontal Líquido-Líquido)

El Botón de acción “Mostrar Imagen del Separador” encontrado en cada una de las hojas de cálculo que conforman el programa, muestra los resultados del dimensionamiento del separador de una forma esquemática, bajo una interfase visual Basic tal como se muestra en la figura 20.

En este esquema el programa mostrará las dimensiones del separador: Longitud o Altura (**L** ó **H**) y Diámetro (**D**); las alturas de las fases dentro del separador (**H_X**); y las dimensiones de las boquillas de entrada y salida (**d_X**). Sin embargo a lo largo de la hoja de cálculo quedarán reportadas las variables intermedias calculadas durante el procedimiento de dimensionamiento del separador y señaladas dentro de la metodología de este trabajo.

HOJA DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO DE UN SEPARADOR BIFÁSICO LÍQUIDO-LÍQUIDO HORIZONTAL

Diseño de un Separador Bifásico Horizontal

Datos de Entrada

Presión de Operación (P) 500 psig Temperatura de Operación (T) 121 °F
514.7 psia 581 °R

Constante Empírica de la Ecuación de Souder y Brown (K_s)

Por Diámetro de Partícula

Diámetro de Partícula (D_p) 89 Micrones
Constante (K_s) 0.163 (in/min)²(cP)²(lb/ft³)²

Por Valores Tabulados según Ambas Fases

Tipo de Separación Requerida Fase Liviana: HD (Med Elí Cetona) / Fase Pesada: Agua

Relación L/D Asumida (L/D)_a 3

Fase Liviana

Flujo Volumétrico (Q_{LV}) 3224.51 BPD 0.210 ft³/s
Viscosidad (μ_{LV}) 0.56 cP
Densidad (ρ_L) 34.8 lb/ft³

Fase Pesada

Flujo Volumétrico (Q_{LP}) 702.34 BPD 0.046 ft³/s
Viscosidad (μ_{LP}) 0.69 cP
Densidad (ρ_P) 62 lb/ft³

Dimensionamiento del Separador

Densidad de la Fase Liviana (ρ_L) 34,800 lb/ft³
Densidad de la Fase Pesada (ρ_P) 62,000 lb/ft³
Flujo Másico de la Fase Liviana (W_{LV}) 26251.10 lb/h
Flujo Másico de la Fase Pesada (W_{LP}) 10186.94 lb/h
Constante (K_s) 0.163 (in/min)²(cP)²(lb/ft³)²
Velocidad de Separación de la Fase Liviana (U_{LV}) 6.532 in/min
Velocidad de Separación de la Fase Pesada (U_{LP}) 8.076 in/min
Diámetro del Separador (D) 34.8 in = 36 in = 3.0 ft
Relación L/D del Separador (L/D) 3.1 **Valor Óptimo de L/D**

AJUSTE DE L/D **ELIMINAR AJUSTE DE L/D**

Área de Líquido Ocupada por la Fase Pesada (A_{LP}) 2.1 ft²
Área de Líquido Ocupada por la Fase Liviana (A_{LV}) 5.0 ft²
Tiempo de Residencia de la Fase Liviana (θ_{LV}) 3.7 min
Tiempo de Residencia de la Fase Pesada (θ_{LP}) 7.0 min

AJUSTE DE L/D **ELIMINAR AJUSTE DE L/D**

Dimensionamiento de las Boquillas del Separador

Flujo Volumétrico de la Mezcla (Q_M) 0.26 ft³/s
Densidad de la Mezcla (ρ_M) 39.665 lb/ft³
Velocidad de la Mezcla en la Boquilla de Entrada (U_{ME}) 9.53 ft/s

CARGAR VALORES DE d_{NL} **MOSTRAR IMAGEN DEL SEPARADOR**

Selector del Diámetro de la Boquilla de Salida de Líquido (d_{LS}) 3 in
Diámetro de la Boquilla de Salida de Líquido (d_{LS}) 3 in
Velocidad de Líquido en la Boquilla de Salida (U_{LS}) 0.93 ft/s

CARGAR VALORES DE d_{NL} **MOSTRAR IMAGEN DEL SEPARADOR** **CERRAR HOJA**

CERRAR HOJA

Figura 21. Botones de acción dentro de las hojas de cálculo. (Ejemplo: Separador Básico Horizontal Líquido-Líquido)

IV.2.- Aplicación y Validación del Programa

IV.2.1.- Proyecto VEPICA-MORIFUELS

Para comprobar la funcionalidad del programa, se hizo uso del mismo con el objetivo de dimensionar dos separadores de producción y un depurador de gas, presentes en la estación de flujo VK-3, siendo este un proyecto de ingeniería básica que la empresa VEPICA actualmente está desarrollando para la empresa MORIFUELS S.A. A su vez los resultados obtenidos serán comparados con softwares especializados en el diseño de separadores que por motivos de confidencialidad no podrán ser mencionados.

La estación de flujo constará de dos separadores de producción (separadores bifásicos líquido-vapor) dispuestos en paralelo y un depurador de gas, que recibirá las corrientes en fase vapor provenientes de los dos separadores de producción.

Las tablas 3 y 4 muestran los datos mínimos que se requieren conocer para dimensionar el separador de producción y el depurador de gas:

Tabla 3. Datos iniciales para el diseño de los separadores de producción.

Separador de Producción	
Condiciones de Operación	
Presión (P), psig	60
Temperatura (T), °F	121
Tiempo de Holdup (t_H), min	4
Tiempo de Surge (t_S), min	3
Datos de la Fase Vapor	
Flujo Volumétrico a Cond. Estándares (Q_{GS}), MMSCFD	12,3
Peso Molecular (PM), lb/lb-mol	20,61
Factor de Compresibilidad (z)	0,99
Viscosidad (μ_G), cp	0,012
Datos de la Fase Líquida	
Flujo Volumétrico (Q_L), BPD	72153,65
Densidad (ρ_L), lb/ft ³	58,679

Tabla 4. Datos iniciales para el diseño del depurador de gas.

Depurador de Gas	
Condiciones de Operación	
Presión (P), psig	40
Temperatura (T), °F	122
Tiempo de Holdup (t_H), min	1
Tiempo de Surge (t_S), min	1
Datos de la Fase Vapor	
Flujo Volumétrico a Cond. Estándares (Q_{GS}), MMSCFD	25
Peso Molecular (PM), lb/lb-mol	20,61
Factor de Compresibilidad (z)	0,99
Viscosidad (μ_G), cp	0,012
Datos de la Fase Líquida	
Flujo Volumétrico (Q_L), BPD	3000
Densidad (ρ_L), lb/ft ³	55,47

Debido a que el separador de producción debe manejar grandes cantidades de líquido, la mejor disposición geométrica por criterio práctico es el separador horizontal, el cual podrá manejar de manera más eficiente las fluctuaciones de flujo en fase líquida debidas a la naturaleza del pozo. Por otro lado, debido a que se requiere extraer del separador un gas lo más seco posible, se escogerá el separador horizontal con malla eliminadora de niebla como tipo de separador a dimensionar. En base a esto, se obtuvo a partir del programa las dimensiones del separador mostradas en la tabla 5:

Tabla 5. Resultados para el dimensionamiento del separador de producción, seleccionando la disposición horizontal líquido-vapor con malla extractora de niebla.

Separador de Producción (Horizontal líquido-vapor con malla)	
Principales Dimensiones del Separador	
Diámetro del Separador (D), ft	10
Altura del Separador (H), ft	31,5
Relación Altura-Diámetro (L/D)	3,2
Diámetro de Boquilla de Entrada (d_{NE}), in	20
Diámetro de Boquilla de Salida de la Fase Líquida (d_{NL}), in	10 ; 12; 16
Diámetro de Boquilla de Salida de la Fase Vapor (d_{NG}), in	8

Las figuras D1 y D2 muestran las respectivas impresiones de pantalla del programa elaborado donde se introducen los datos iniciales y se obtienen un resultado gráfico del cálculo (ver Apéndice D).

El depurador de gas al contrario del separador de producción, deberá ser capaz de manejar grandes cantidades de vapor y pequeñas cantidades de líquido, siendo este flujo de líquido poco variable, ya que el mismo es previamente controlado aguas arriba a este separador. Debido a lo antes mencionado y basándose en los criterios prácticos expuestos en el marco teórico, se seleccionará la configuración vertical. Por otro lado, debido a que este equipo requiere eliminar la mayor cantidad de líquido contenido en la fase vapor, se buscará el dimensionamiento de un separador con eliminador de niebla.

Debido a limitaciones en cuanto a los datos iniciales del proyecto, se descarta el dimensionamiento del paquete de vena, siendo escogido el separador vertical líquido-vapor con malla extractora de niebla, como el tipo de recipiente a dimensionar para el depurador de gas. Así se obtienen los resultados a partir del programa elaborado, los cuales son mostrados en la tabla 6:

Tabla 6. Resultados para el dimensionamiento del depurador de gas, seleccionando la disposición vertical líquido-vapor con malla extractora de niebla.

Depurador de Gas (Vertical líquido-vapor con malla)	
Principales Dimensiones del Separador	
Diámetro del Separador (D), ft	4,5
Altura del Separador (H), ft	9,5
Relación Altura-Diámetro (L/D)	2,1
Diámetro de Boquilla de Entrada (d_{NE}), in	16
Diámetro de Boquilla de Salida de la Fase Líquida (d_{NL}), in	2; 3
Diámetro de Boquilla de Salida de la Fase Vapor (d_{NG}), in	12

Las figuras D3 y D4 muestran las impresiones de pantalla del programa elaborado, en las cuales se introducen los datos iniciales y se obtienen los resultados de cálculo de una forma esquematizada (ver Apéndice D).

La verificación de los resultados y comprobación del buen funcionamiento del programa, se llevo a cabo mediante la comparación entre los datos obtenidos mediante el programa, los cuales fueron reportados en las tablas 5 y 6, y los datos arrojados mediante el uso de un software comercial.

Debido a que los softwares utilizados no arrojan dimensiones de boquillas, solo se compararán las principales dimensiones del separador, tal como se muestra en las tablas 7 y 8:

Tabla 7. Comparación entre los resultados del separador de producción obtenidos con el programa elaborado y los otros softwares comerciales utilizados.

Comparación de los resultados para el separador horizontal (líquido-vapor) con malla			
Parámetro	Hojas de Cálculo	Software No. 1	Software No. 2
Diámetro del Separador (D), ft	10	9,5	12
Altura del Separador (H), ft	31,5	38	42
Relación Altura-Diámetro (L/D)	3,2	4	3,5

Tabla 8. Comparación entre los resultados del depurador de gas obtenidos con el programa elaborado y otro software comercial utilizado.

Comparación de los resultados para el separador vertical (líquido-vapor) con malla		
Parámetro	Hojas de Cálculo	Software No. 1
Diámetro del Separador (D), ft	4,5	5
Altura del Separador (H), ft	9,5	11
Relación Altura-Diámetro (L/D)	2,1	2,2

Como se muestran en las tablas 7 y 8, los resultados obtenidos aunque no son idénticos se aproximan considerablemente, presentando una desviación de hasta el 16,6% para el caso del separador de producción (cálculo del diámetro) entre los resultados obtenidos por la hoja de calculo y el Software No.1, lo cual es aceptable si se compara con la desviación del 20,8% que existe para el mismo caso entre los resultados reportados por ambos software comerciales (Software No.1 y No.2).

Las desviaciones asociadas a estos resultados son consecuencia de la diferencia entre las metodologías utilizadas por el programa y los diferentes software utilizados para hallar el dimensionamiento del separador, y los criterios tomados en cuenta durante estos cálculos, muchas empresas utilizan criterios de diseño más conservadores generando dimensiones del separador más grandes de lo necesario. No existe un criterio bueno o malo, muchas empresas adoptan valores propios tomados de la experiencia práctica, dándole unicidad a sus metodologías de diseño. Se recuerda que el programa en estudio ha sido elaborado en base a las metodologías y criterios de diseño reportados en bibliografías y revistas ofrecidas al público en general, las cuales no presentan carácter de confidenciabilidad.

Lamentablemente sólo el software No.1, permitió obtener una visión de algunos de los criterios utilizados durante el dimensionamiento del separador. Uno de los parámetros que afecta en mayor escala el dimensionamiento del separador es la constante de la velocidad crítica (**k**), la cual es calculada por el programa en estudio mediante correlaciones publicadas por la Otto York Company (York, 1993) las cuales son dependientes de la presión de operación del separador (ver ecuaciones 8, 9 y 10). Por otro lado el software No. 1 tiene valores constantes estipulados para cada tipo de separador, siendo 0,4 para el caso del separador horizontal líquido vapor, y 0,278 para el caso del depurador de gas vertical.

La tabla 9 muestra los valores de estas constantes de velocidad crítica arrojados por ambos programas en los dos casos de diseño:

Tabla 9. Valores de la constante de velocidad crítica (k) arrojados tanto por el programa en estudio como por el software comercial.

Valores de la constante de velocidad crítica (k)		
Tipod de Separador	Hojas de Cálculo	Software No. 1
Horizontal líquido-vapor con malla	0,331	0,400
Vertical líquido-vapor con malla	0,338	0,278

En el caso del separador vertical líquido-vapor con malla (Depurador de gas), el valor de la constante de velocidad crítica utilizada por el Software No. 1 es menor al calculado por el programa, esto dará como resultado un menor valor de velocidad crítica en el programa (ecuación 3). Debido a que el diámetro del separador vertical es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del valor de la velocidad crítica (ecuación 25), a valores más pequeños de dicha velocidad mayor será el diámetro calculado (ver tabla 8).

Por otro lado dentro de la metodología de diseño para separadores horizontales, el dimensionamiento del diámetro del separador no depende de la velocidad del gas sino de los volúmenes de líquido que manejará el recipiente y del valor que inicialmente se asume para la relación longitud-diámetro del separador (ecuación 36). De esta forma para valores asumidos más grandes de la relación longitud-diámetro del separador se obtendrán valores más bajos del diámetro del separador. La variación de las dimensiones del separador en función de la relación longitud-diámetro asumida se muestran en la tabla 10:

Tabla 10. Variación de las dimensiones del separador de producción obtenidas con el programa en estudio, en función de la relación longitud-diámetro del separador asumida $(L/D)_A$

Variación de las dimensiones del separador de prueba (Horizontal liquido-vapor con malla) en función de la relación longitud-diámetro asumida $(L/D)_A$					
Relación longitud-diámetro del separador asumida $(L/D)_A$	3	3,7	4,2	4,9	5,8
Diámetro del separador (D), ft	12	10,5	10	9,5	9
Longitud del separador (L), ft	21,5	28,5	31,5	35,5	40
Relación longitud-diámetro del separador calculada $(L/D)_C$	1,8	2,7	3,2	3,7	4,4

Los valores de la tabla 10, se obtuvieron haciendo uso del programa en estudio y variando el valor de la relación longitud-diámetro del separador asumida, para así obtener las dimensiones del separador para cada valor de la relación. En base a esta tabla se puede predecir que el Software No.1 utilizó un valor para la relación $(L/D)_A$ entre 4,9 y 5,8. Debido a truncamientos en los valores del programa no se pudo maximizar el rango comprendido entre estos dos valores.

IV.2.2.- Casos Adicionales de Separadores

Adicionalmente a la aplicabilidad de las hojas de cálculo en los casos correspondiente al proyecto VEPICA-MORIFUELS, se necesitaron probar las hojas restantes con datos reales de separadores, para comparar los resultados arrojados por el programa con los arrojados por los softwares ya existentes, y así comprobar la funcionalidad del programa.

Durante la realización de este trabajo de grado sólo se dispuso de software destinados al dimensionamiento de separadores bifásicos líquido-vapor horizontales y verticales (los cuales se utilizaron para comprobar los resultados del proyecto), y al dimensionamiento de separadores verticales con paquete de aletas en 1 y 2 etapas y separadores horizontales trifásicos con placa. Por otro lado no se encontró datos reales suficientes para comprobar los resultados de los separadores restantes, por lo cual, queda fuera de este estudio la comprobación de las hojas correspondientes al separador horizontal bifásico (líquido-líquido), y al separador horizontal trifásico (líquido-líquido-vapor) con bota.

a) Separador vertical bifásico (líquido-vapor) con paquete de aletas en 1 etapa

Los datos iniciales requeridos para el dimensionamiento de este separador se presentan en la tabla 11.

Los resultados arrojados por el programa son reportados en la tabla 12. En la figura D5 se observa una impresión de pantalla del programa elaborado donde se introducen los datos iniciales para el dimensionamiento de este tipo de separador y en las figuras D6 y D7 las respectivas impresiones de pantalla donde se muestran los resultados del cálculo de forma esquemática (ver Apéndice D).

Tabla 11. Datos iniciales para el diseño de un separador vertical bifásico (líquido-vapor) con paquete de aletas en 1 etapa.

Separador Vertical (Líquido-Vapor) con Paquete de Aletas en 1 Etapa	
Condiciones de Operación	
Presión (P), psig	1250
Temperatura (T), °F	90
Profundidad de la Caja de Aletas (t_{vb}), ft	0,98
Parámetro de Flujo en la Cara de las Aletas (θ_v)	0,01
Porcentaje de Margen de Diseño (% _{Diseño}), %	25
Tiempo de Residencia de Líquido (t_R), min	2
Altura entre el Nivel Alto de Líquido y el Fondo del Paquete de Aletas (X_1), ft	1,64
Altura entre el Tope del Paquete de Aletas y el Tope del Separador (X_2), ft	1,33
Tensión Interfacial entre el Líquido y el Vapor (σ), dinas/cm	7,52
Datos de la Fase Vapor	
Flujo Volumétrico a Cond. Estandares (Q_{GS}), MMSCFD	350
Peso Molecular (PM), lb/lb-mol	24,2
Factor de Compresibilidad (z)	0,69
Datos de la Fase Líquida	
Flujo Volumétrico (Q_L), BPD	2000
Viscosidad (μ_L), cp	0,065
Densidad (ρ_L), lb/ft ³	30,45

Tabla 12. Resultados para el dimensionamiento del separador vertical bifásico (líquido-vapor) con paquete de aletas en 1 etapa.

Separador Vertical (líquido-vapor) con Dispositivo de Aletas en 1 Etapa	
Dimensiones Principales del Separador	
Diámetro del Separador (D), ft	8
Longitud del Separador (L), ft	12
Relación L/D	1,5
Diámetro de Boquilla de Entrada (d_{NE}), in	20
Diámetro de Boquilla de Salida de la Fase Líquida (d_{NL}), in	2
Diámetro de Boquilla de Salida de la Fase Vapor (d_{NG}), in	20

La comparación entre los resultados de la hoja de cálculo y el otro software utilizado se muestran a continuación:

Tabla 13. Comparación entre los resultados del separador vertical bifásico (líquido-vapor) con paquete de aletas en 1 etapa, obtenidos con la hoja de cálculo y otro software comercial utilizado.

Comparación de los resultados para el separador vertical (líquido-vapor) con dispositivo de aletas en 1 etapa		
Parámetro	Hojas de Cálculo	Software No. 3
Diámetro del Separador (D), ft	8	8
Altura del Separador (H), ft	12	12
Relación Altura-Diámetro (L/D)	1,5	1,5

Como se observa en la tabla 13, los resultados arrojados por el programa en estudio y el software comercial utilizado son idénticos, esto se debe a que el software utiliza los mismos criterios de diseño y la misma metodología de cálculo empleada para la elaboración de la hoja de cálculo.

b) Separador vertical bifásico (líquido-vapor) con paquete de aletas en 2 etapas

Los datos iniciales requeridos para el dimensionamiento de este separador se presentan en la tabla 14, y los resultados obtenidos a partir de la hoja de cálculo son reportados en la tabla 15. En la figura D8 se observa una impresión de pantalla del programa elaborado donde se introducen los datos iniciales para el dimensionamiento de este tipo de separador y en las figuras D9 y D10 las respectivas impresiones de pantalla donde se muestran los resultados del cálculo de forma esquemática (ver Apéndice D).

Tabla 14. Datos iniciales para el diseño de un separador vertical bifásico (líquido-vapor) con paquete de aletas en 2 etapas.

Separador Vertical (Líquido-Vapor) con Paquete de Aletas en 2 Etapas	
Condiciones de Operación	
Presión (P), psig	800
Temperatura (T), °F	80
Profundidad de la Caja de Aletas (t_{vb}), ft	0,98
Parámetro de Flujo en la Cara de las Aletas (θ_v)	0,01
Porcentaje de Margen de Diseño (% _{Diseño}), %	25
Tiempo de Residencia de Líquido (t_R), min	2
Altura entre el Tope del Paquete de Aletas y el Tope del Separador (Y_1), ft	0,33
Tensión Interfacial entre el Líquido y el Vapor (σ), dinas/cm	10
Datos de la Fase Vapor	
Flujo Volumétrico a Cond. Estándares (Q_{GS}), MMSCFD	137,9
Peso Molecular (PM), lb/lb-mol	21,76
Factor de Compresibilidad (z)	0,98
Datos de la Fase Líquida	
Flujo Volumétrico (Q_L), BPD	3097,6
Viscosidad (μ_L), cp	2
Densidad (ρ_L), lb/ft ³	43,7

Tabla 15. Resultados para el dimensionamiento del separador vertical bifásico (líquido-vapor) con paquete de aletas en 2 etapas.

Separador Vertical (líquido-vapor) con Dispositivo de Aletas en 2 Etapas	
Dimensiones Principales del Separador	
Diámetro del Separador (D), ft	5
Longitud del Separador (L), ft	12
Relación L/D	2,4
Diámetro de Boquilla de Entrada (d_{NE}), in	16
Diámetro de Boquilla de Salida de la Fase Líquida (d_{NL}), in	2; 3
Diámetro de Boquilla de Salida de la Fase Vapor (d_{NG}), in	16

En la tabla 16 se muestra la comparación de los resultados obtenidos mediante la hoja de cálculo y el software comercial. Al igual que en el caso anterior el software comercial utiliza los mismos criterios y la misma metodología empleada durante la elaboración de la hoja de cálculo, sin embargo el software en este tipo de separador toma en cuenta unos niveles de alarma adicionales, los cuales no se contemplaron en la hoja de cálculo, es por ello que aunque los diámetros calculados sean idénticos, la altura calculada por el software es mayor a la que arroja mediante el uso de la hoja de cálculo presentando una desviación del 20%.

Tabla 16. Comparación entre los resultados del separador vertical bifásico (líquido-vapor) con paquete de aletas en 2 etapas, obtenidos con la hoja de cálculo y otro software comercial utilizado.

Comparación de los resultados para el separador vertical (líquido-vapor) con dispositivo de aletas en 2 etapas		
Parámetro	Hojas de Cálculo	Software No. 3
Diámetro del Separador (D), ft	5	5
Altura del Separador (H), ft	12	15
Relación Altura-Diámetro (L/D)	2,4	3

c) Separador horizontal trifásico (líquido-líquido-vapor) con placa

Los datos iniciales requeridos para el dimensionamiento de este separador se presentan en la tabla 17, y los resultados obtenidos a partir de la hoja de cálculo son reportados en la tabla 18. Las figuras D11 y D12 muestran las impresiones de pantalla del programa elaborado destinadas a la introducción de los datos iniciales y a la obtención del resultado del cálculo en forma esquematizada (Apéndice D).

Tabla 17. Datos iniciales para el diseño de un separador horizontal trifásico (líquido-líquido-vapor) con placa.

Separador Horizontal (Líquido-Líquido-Vapor) con Placa	
Condiciones de Operación	
Presión (P), psig	15
Temperatura (T), °F	90
Tiempo de Holdup (t_H), min	3
Tiempo de Surge (t_S), min	2
Diámetro de Partícula (D_P), micrones	127
Relación Diámetro-Longitud del Separador Asumida (L/D) _A	3
Datos de la Fase Vapor	
Flujo Volumétrico a Cond. Estándares (Q_{GS}), MMSCFD	2
Peso Molecular (PM), lb/lb-mol	37,08
Factor de Compresibilidad (z)	0,982
Datos de la Fase Líquida Liviana	
Flujo Volumétrico (Q_{LL}), BPD	1500
Densidad (ρ_{LL}), lb/ft ³	43,19
Viscosidad (μ_{LL}), cp	0,452
Datos de la Fase Líquida Pesada	
Flujo Volumétrico (Q_{LH}), BPD	300
Densidad (ρ_{LH}), lb/ft ³	61,74
Viscosidad (μ_{LH}), cp	0,563

Tabla 18. Resultados para el dimensionamiento del separador horizontal trifásico (líquido-líquido-vapor) con placa.

Separador Horizontal (líquido-líquido-vapor) con Placa	
Dimensiones Principales del Separador	
Diámetro del Separador (D), ft	4
Longitud del Separador (L), ft	8,5
Relación L/D	2,1
Diámetro de Boquilla de Entrada (d_{NE}), in	6
Diámetro de Boquilla de Salida de la Fase Líquida Liviana (d_{LL}), in	1,5; 1
Diámetro de Boquilla de Salida de la Fase Líquida Pesada (d_{LH}), in	0,75; 1; 1,5; 2
Diámetro de Boquilla de Salida de la Fase Vapor (d_{NV}), in	4

La tabla 19 presenta la comparación de los resultados obtenidos mediante la hoja de cálculo y el software comercial.

Tabla 19. Comparación entre los resultados del separador horizontal trifásico (líquido-líquido-vapor) con placa, obtenidos con la hoja de cálculo y otro software comercial utilizado.

Comparación de los resultados para el separador horizontal (líquido-líquido-vapor) con placa		
Parámetro	Hojas de Cálculo	Software No. 1
Diámetro del Separador (D), ft	4	3
Longitud del Separador (L), ft	8,5	12
Relación Altura-Diámetro (L/D)	2,1	4

Los resultados arrojados por el programa en estudio y el software comercial presentan una desviación del 25% en cuanto al cálculo del diámetro del separador, y del 29,2% en cuanto al cálculo de la longitud, la cual puede ser debida a la metodología de cálculo utilizada. Sin embargo, esto es imposible de corroborar ya que no se disponen de las ecuaciones utilizadas por el software para realizar el dimensionamiento del separador, y los criterios mostrados son insuficientes para concluir la causa de la desviación en los resultados.

CAPÍTULO V: Conclusiones

En el siguiente capítulo se presentan las conclusiones sobre el desarrollo del programa para el diseño de separadores bifásicos y trifásicos, horizontales y verticales.

- ✦ La metodología desarrollada para el dimensionamiento de los separadores se basó en las publicaciones realizadas por Monnery y Svrcek en 1993 y 1994.
- ✦ Los resultados del dimensionamiento de separadores pueden variar dependiendo de la metodología de cálculo y los criterios de diseño utilizados.
- ✦ Cada empresa petrolera o fabricante de separadores tiene una metodología y un conjunto de criterios de diseño particulares, los cuales influyen en los resultados obtenidos para el dimensionamiento del separador.
- ✦ En separadores verticales con y sin malla extractora de niebla, el diámetro es calculado a partir de la velocidad crítica del gas, y la altura es hallada a partir de los tiempos de retención del líquido.
- ✦ En separadores verticales con paquete de aletas, el diámetro es calculado a partir de criterios de accesibilidad y tamaño requerido para el paquete de aletas, y la altura depende igualmente del tamaño del dispositivo extractor de niebla y de los tiempos de retención de líquido.
- ✦ En separadores horizontales el diámetro depende de los tiempos de retención y de la relación diámetro-longitud del separador asumida inicialmente, y la longitud depende del tiempo de separación.
- ✦ La diferencia entre la metodología de separadores líquido-vapor, líquido-líquido y líquido-líquido-vapor es que para los primeros se toma en cuenta la ecuación de Sauters-Brown para la separación de las fases líquido-vapor, para los

segundos se toma en cuenta la ley de Stokes para la separación de las fases líquido-líquido y para los terceros se utilizan ambas ecuaciones.

- ▲ En los separadores de fases líquidas se debe tomar en cuenta los tiempos de separación y de residencia de ambas fases líquidas en el separador.
- ▲ Las hojas de cálculo de separadores bifásicos líquido-vapor horizontales y verticales arrojaron resultados de diseño consistentes con los obtenidos mediante los respectivos softwares comerciales con los cuales fueron comprobados, presentando desviaciones menores del 25% en los resultados.
- ▲ Los resultados obtenidos a partir de la hoja de cálculo para separadores trifásicos (líquido-líquido-vapor) con placa, presentan una desviación del 30% en comparación a los obtenidos mediante el software comercial.
- ▲ Los resultados obtenidos para los separadores del proyecto VEPICA-MORIFUELS dieron consistentes con los calculados por la consultora.
- ▲ Los resultados obtenidos con esta metodología de diseño, representan estimaciones iniciales del tamaño del separador, aceptables en la etapa de ingeniería básica de un proyecto.

CAPÍTULO VI: Recomendaciones

A continuación se presentan las recomendaciones sobre el desarrollo del programa para el diseño de separadores bifásicos y trifásicos, horizontales y verticales.

- ✦ Realizar una versión de las hojas en el sistema de unidades internacional.
- ✦ Incorporar cálculos mecánicos, tales como tipos de cabezales del separador, espesor y peso del equipo, a fin de tener un resultado más completo.
- ✦ Exportar los resultados gráficos de las hojas de cálculo a un archivo imprimible.
- ✦ Comprobar los resultados de las hojas de cálculo correspondientes al diseño de los separadores horizontales líquido-líquido y de los separadores horizontales líquido-líquido-vapor con bota, con el uso de otros software comerciales.

CAPÍTULO VII: Referencias Bibliográficas

Abdel-Aal, H., Aggour, M. y Fahim M. (2003). *Petroleum and gas field processing*. New York, E.U.

Amistco (2004). *Compressor Suction Drums*. Amistco Separation Products, Inc. 6 pp.

API (1989). *Specifications for Oil and Gas Specifications*. American Petroleum Institute, Specification 12J. 25 pp.

Arnold, K. y M. Stewart. (1999). *Surface Production Operations: Design of Oil-Handling Systems and Facilities*. Gulf Publishing Company. (101 – 159) pp.

Bradley H., et al. (1987). *Petroleum Engineering Handbook*. Society of Petroleum Engineers. E.U., 3ra Edición, 1992. (12-1, 12-44) pp.

CIED (1995). *Ingeniería de Producción: Nivel IV. Separadores Gas-Líquido*. Instituto de Desarrollo Profesional y Técnico. 134 pp.

Gerunda, A. (1981). *How To Size Liquid Vapor Separators*. Chemical Engineering. (81 – 84) pp.

GPSA (1998). *Engineering Data Book. Section 7: Separators and Filters*. Gas Processors Suppliers Association. Versión FPS. (7-1, 7-15) pp.

Guo B., Lyons W. y Ghalambor A. (2007). *Petroleum Production Engineering*. Gulf Professional Publishing. (118 – 124) pp.

Lyons W. (1996). *Standard Handbook Petroleum and Natural Gas Engineering (Volumen 2)*. Gulf Professional Publishing. (702 – 733) pp.

Monnery, W. y Svrcek, W. (1994). *Successfully Specify Three-Phase Separators*. Chemical Engineering Progress. (29 – 40) pp

Otto H. York Company Inc. (1993). *Mist Eliminations in Gas Treatment Plants and Refineries*. Engineering.

Otto H. York Company Inc. (2007). *Mist Eliminations*. Koch-Glitsch LP. 20 pp.

PDVSA (1995). *Manual No. MDP-03-S-01, Tambores Separadores: Principios Básicos*. Manual de Diseño de Proceso. 29 pp.

Sarma, H. (1981). *How To Size Gas Scrubbers*. Hydrocarbon Processing. 60, (251 – 255) pp.

Svrcek, W. y Monnery, W. (1993). *Design Two-Phase Separators Within the Right Limits*. Chemical Engineering Progress. (53 – 60) pp.

Talavera, P. (1990). *Selecting Gas-Liquid Separators*. Hydrocarbon Processing. 81 pp.

Watkins, R. (1967). *Sizing Separators and Accumulators*. Hydrocarbon Processing. (253 – 256) pp.

CAPÍTULO VIII: Apéndices

APÉNDICE A

Dimensionamiento de Boquillas

Para dimensionar las boquillas del separador se seguirán los siguientes pasos citados a continuación:

A.1.- Boquilla de Alimentación

Paso 1.- Determinación del flujo volumétrico de la mezcla

Según la siguiente ecuación:

$$Q_M = Q_{GA} + Q_L \quad (\text{Ec. A1})$$

Paso 2.- Determinación de la densidad de mezcla

La densidad de la mezcla es determinada mediante las siguientes ecuaciones:

$$\lambda = \frac{Q_L}{Q_M} \quad (\text{Ec. A2})$$

$$\rho_M = \rho_L \cdot \lambda + \rho_G \cdot (1 - \lambda) \quad (\text{Ec. A3})$$

Paso 3.- Determinación de la velocidad en la boquilla de entrada (Watkins, 1967)

Se calcula a partir de la ecuación:

$$U_{NE} = \frac{60}{\sqrt{\rho_M}} \quad (\text{Ec. A4})$$

Paso 4.- Determinación del diámetro de la boquilla de entrada

Según la ecuación:

$$d_{NE} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_M}{\pi \cdot U_{NE}}} \quad (\text{Ec. A5})$$

A.2.- Boquilla de Salida de la fase Vapor

Paso 5.- Determinación de la velocidad en la boquilla de vapor

Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$U_{NG} = \frac{60}{\sqrt{\rho_G}} \quad (\text{Ec. A6})$$

Paso 6.- Determinación del diámetro de la boquilla de vapor

Puede ser calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$d_{NG} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{GA}}{\pi \cdot U_{NG}}} \quad (\text{Ec. A7})$$

A.3.- Boquilla de Salida de la Fase Liquida

Paso 7.- Selección del criterio de velocidad en la boquilla de líquido

La velocidad en la boquilla de líquido U_{NL} , puede variar según sea la fase característica del fluido:

- ▲ Velocidad limite para boquillas de salida de liquido “fase liviana” (hidrocarburo): entre 3,3 y 9,8 ft/s
- ▲ Velocidad limite para boquillas de salida de liquido “fase pesada” (agua): menores a 6,6 ft/s.

Paso 8.- Determinación del diámetro de la boquilla de líquido

Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$d_{NL} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_L}{\pi \cdot U_{NL}}} \quad (\text{Ec. A8})$$

APÉNDICE B

Dimensionamiento de Internos a la Entrada del Separador

El dimensionamiento de los internos a la entrada del separador se realizará mediante el siguiente procedimiento:

B.1.- Dimensionamiento del Codo de 90°

Paso 1.- Determinación el diámetro del codo

El diámetro del codo de 90° debe ser igual al diámetro de la boquilla de entrada, tal como se describe mediante la siguiente ecuación:

$$D_C = d_{NE} \quad (\text{Ec. B1})$$

Paso 2.- Determinación de la distancia entre el extremo soldado al separador y el centro de descarga.

Existen dos tipos de codos de 90°, para los cuales varía esta distancia.

- ▲ Codos de radio corto, donde la distancia viene dada por la siguiente ecuación:

$$L_{cc} = d_{NE} \quad (\text{Ec. B2})$$

- ▲ Codos de radio largo, donde la distancia está determinada por la ecuación:

$$L_{CL} = \frac{3 \cdot d_{NE}}{2} \quad (\text{Ec. B3})$$

B.2.- Dimensionamiento del Distribuidor en Forma de “T”

Paso 1.- Determinación de la altura de las ranuras del distribuidor

La altura de la ranura corresponde a un tercio de la longitud de la circunferencia interna del tubo distribuidor, tal como se describe mediante la siguiente ecuación:

$$I_{ran} = \frac{\pi \cdot d_{NE}}{3} \quad (\text{Ec. B4})$$

Paso 2.- Determinación del ancho de las ranuras del distribuidor

Por criterio el ancho de las ranuras S_{ran} , debe ser de 0,6 in.

Paso 3.- Determinación del área de las ranuras del distribuidor

La cual viene dada por la siguiente ecuación:

$$a_{ran} = S_{ran} \cdot I_{ran} \quad (\text{Ec. B5})$$

Paso 4.- Determinación de la velocidad máxima a la salida del distribuidor para que no ocurra arrastre de líquido

Esta velocidad se puede calcular a través de dos ecuaciones (Ecuaciones B7 y B9) dependiendo del valor que tenga la relación comprendida por la distancia entre la boquilla de entrada y la superficie de choque (superficie de líquido en el separador) y el ancho de las ranuras del distribuidor (Ecuaciones B6 y B8).

De esta forma:

▲ Para una relación:
$$\frac{(H_{LIN} \cdot 12) - \left(\frac{d_{NE}}{2}\right)}{S_{ran}} \leq 5 \quad (\text{Ec. B6})$$

$$U_E = \frac{0,00053 \cdot \sigma_L}{\mu_G \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0,5}} \quad (\text{Ec. B7})$$

▲ Para una relación:
$$\frac{(H_{LIN} \cdot 12) - \left(\frac{d_{NE}}{2}\right)}{S_{ran}} > 5 \quad (\text{Ec. B8})$$

$$U_E = \frac{0,0003 \cdot \sigma_L}{\mu_G \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{S_{ran}}{(H_{LIN} \cdot 12) - \left(\frac{d_{NE}}{2}\right)}\right)^{0,5}} \quad (\text{Ec. B9})$$

Paso 5.- Determinación del número de ranuras del distribuidor

El número de ranuras en el distribuidor se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$N_S = \frac{144 \cdot Q_M}{a_{ran} \cdot U_E} \quad (\text{Ec. B10})$$

Paso 6.- Determinación de la separación entre ranuras del distribuidor

La separación entre las ranuras del distribuidor d_{ran} , se especifican por criterio en 1 in.

Paso 7.- Determinación de la longitud del distribuidor

Esta longitud vendrá determinada por la siguiente ecuación:

$$L_{dis} = N_S \cdot (S_{ran} + 1) + 2 + d_{NE} \quad (\text{Ec. B11})$$

Estas dimensiones pueden ser visualizadas mediante la siguiente figura:

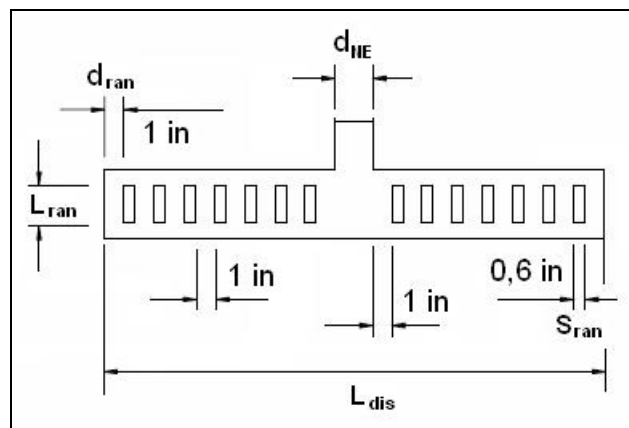


Figura B1. Dimensiones de un distribuidor de ranuras.

B.3.- Dimensionamiento de la Placa Deflectora

Paso 1.- Determinación de la altura de la placa deflectora

Esta altura puede ser determinada mediante la siguiente ecuación:

$$H_{PD} = 2 \cdot d_{NE} \quad (\text{Ec. B12})$$

Paso 2.- Determinación del ancho de la placa deflectora

Es calculada mediante la ecuación:

$$d_{PD} = d_{NE} + 2.36 \quad (\text{Ec. B13})$$

Paso 3.- Determinación de la longitud de separación de la placa deflectora

Puede ser calculada a través de la siguiente ecuación:

$$L_{PD} = d_{NE} \quad (\text{Ec. B14})$$

Las dimensiones de la placa deflectora son mostradas a continuación:

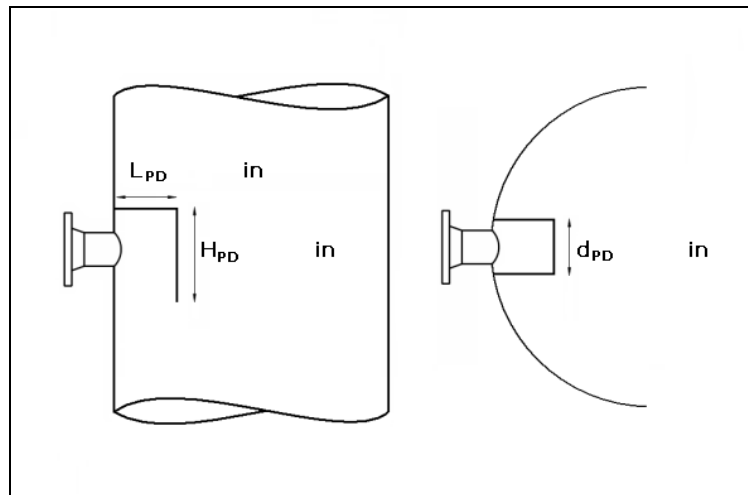


Figura B2. Dimensiones de una placa deflectora.

APÉNDICE C

Conversión entre la Altura del cilindro y el área transversal

Los investigadores Svrecek y Monnery (1993 y 1994) publicaron en sus trabajos, dos correlaciones, una mediante la cual partiendo de la relación entre la altura ocupada por un fluido en un cilindro horizontal y el diámetro del mismo, se podría determinar la relación entre el área transversal ocupado por dicho fluido y el área transversal del cilindro. La segunda correlación permitiría realizar el calculo inverso.

En tal sentido, la elaboración del programa se basará en estas correlaciones para realizar los cálculos pertinentes relacionados con el diseño de separadores horizontales.

Para hallar la relación entre el área transversal ocupada por el fluido y el área transversal del cilindro a partir de la relación entre la altura ocupada por el fluido en el cilindro y el diámetro del mismo, se implementará la correlación indicada por las siguientes tres ecuaciones:

$$x = \frac{H_{\text{fluido}}}{D} \quad (\text{Ec. C1})$$

$$y = \frac{A_{\text{fluido}}}{A_T} \quad (\text{Ec. C2})$$

$$y = \frac{4,7559E^{-5} + 0,174875 \cdot x + 5,668973 \cdot x^2 - 4,916411 \cdot x^3 - 0,145348 \cdot x^4}{1 + 3,924091 \cdot x - 6,358805 \cdot x^2 + 4,018448 \cdot x^3 - 1,801705 \cdot x^4} \quad (\text{Ec. C3})$$

Para realizar el cálculo inverso (segunda correlación), se utilizará las ecuaciones:

$$x = \frac{A_{\text{fluido}}}{A_T} \quad (\text{Ec. C4})$$

$$y = \frac{H_{\text{fluido}}}{D} \quad (\text{Ec. C5})$$

$$y = \frac{0,001537 + 3,2992 \cdot x + 24,353518 \cdot x^2 - 36,999376 \cdot x^3 + 9,892851 \cdot x^4}{1 + 26,787101 \cdot x - 22,923932 \cdot x^2 - 14,844824 \cdot x^3 + 10,529572 \cdot x^4} \quad (\text{Ec. C6})$$

APÉNDICE D

Resultados del Programa

A continuación se muestran las imágenes capturadas que muestran los resultados al correr el programa.

D.1.- Separador Horizontal Bifásico Líquido-Vapor con Extractor de Niebla Tipo Malla (Separador de Producción):

Este separador fue diseñado partiendo de los siguientes datos iniciales:

Selección del Tipo de Separador Bifásico Líquido-Vapor e Introducción de los Datos Iniciales para el Diseño

Vertical sin Eliminador de Niebla | Vertical con Malla Eliminadora de Niebla | Vertical con Paquete de Aletas en 1 Etapa
 Vertical con Paquete de Aletas en 2 Etapas | Horizontal sin Eliminador de Niebla | Horizontal con Malla Eliminadora de Niebla

ESQUEMA

DATOS GENERALES

Presión de Operación (P) 60 psig
 Temperatura de Operación (T) 121 °F
 Tiempo de Holdup (t_H) 4 min
 Tiempo de Surge (t_S) 3 min
 Relación Asumida Longitud-Diámetro del Separador (L/D)_A 4,2

FASE VAPOR

Flujo Volumétrico a Cond. Estándares (Q_{G3}) 12,3 MMSCFD
 Peso Molecular (PM) 20,61 lb/lb-mol
 Factor de Compresibilidad (z) 0,99

FASE LÍQUIDA

Flujo Volumétrico (Q_L) 72153,65 BPD
 Densidad (P_L) 58,679 lb/ft³
 Gravedad API (°API) °API
 Gravedad Específica (s.g.)

Aceptar Cancelar

Figura D1. Pantalla de Introducción de los Datos Iniciales para el Diseño del Separador Horizontal Líquido-Vapor con Malla Eliminadora de Niebla.

Los resultados gráficos que arroja la hoja de cálculo se muestran en la figura D2:

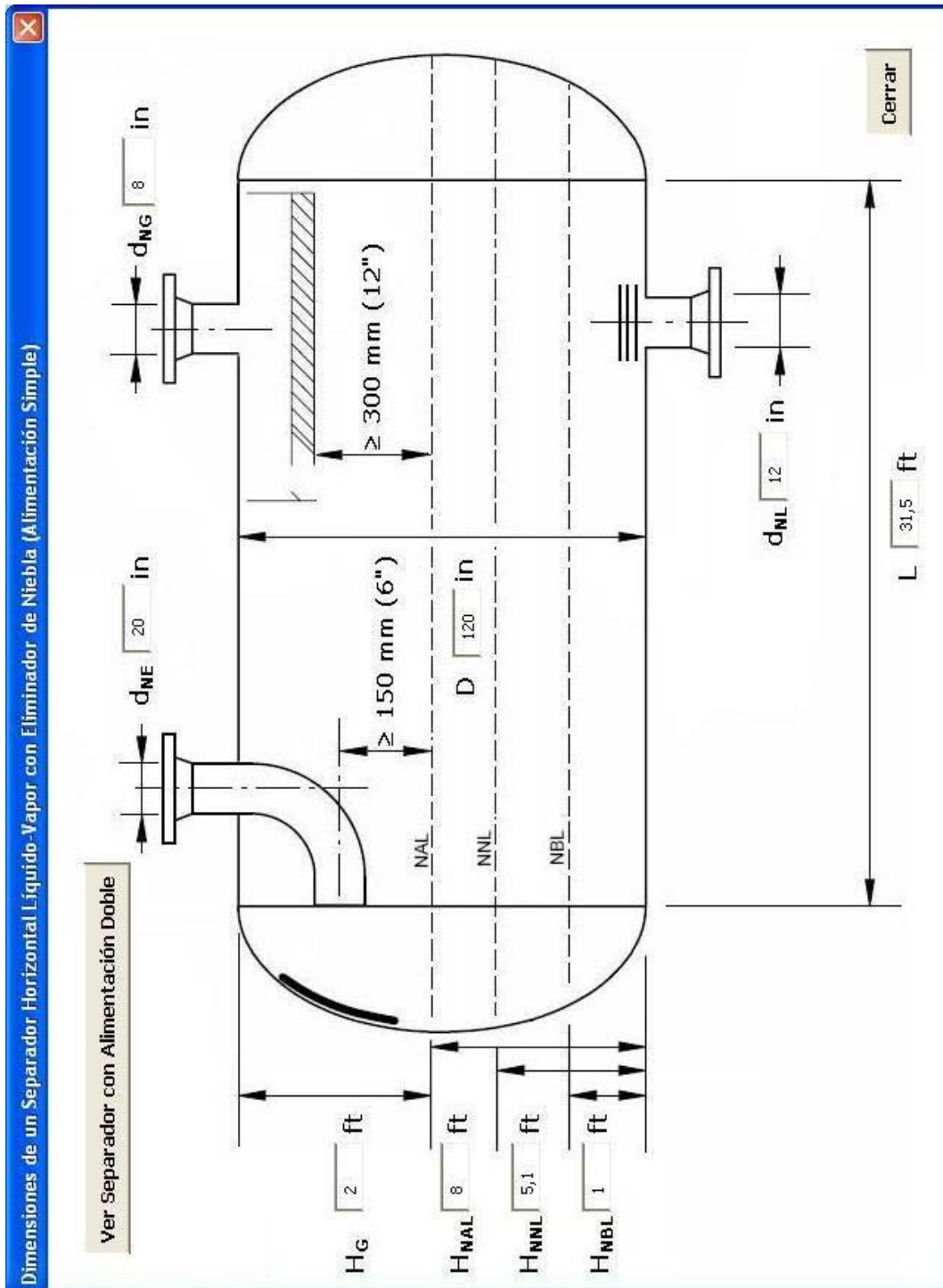


Figura D2. Pantalla de Resultados del Diseño del Separador Horizontal Líquido-Vapor con Malla Eliminadora de Niebla.

D.2.- Separador Vertical Bifásico Líquido-Vapor con Extractor de Niebla Tipo Malla (Depurador de Gas):

Este separador fue diseñado partiendo de los siguientes datos iniciales:

Selección del Tipo de Separador Bifásico Líquido-Vapor e Introducción de los Datos Iniciales para el Diseño

Vertical con Paquete de Aletas en 2 Etapas | Horizontal sin Eliminador de Niebla | Horizontal con Malla Eliminadora de Niebla
 Vertical sin Eliminador de Niebla | Vertical con Malla Eliminadora de Niebla | Vertical con Paquete de Aletas en 1 Etapa

ESQUEMA

DATOS GENERALES

Presión de Operación (P) 40 psig
 Temperatura de Operación (T) 122 °F
 Tiempo de Holdup (t_H) 1 min
 Tiempo de Surge (t_S) 1 min

¿Desea obtener el diseño de algún interno a la entrada del separador?

Tensión Superficial de la Fase Líquida (σ) dinas/cm

FASE VAPOR

Flujo Volumétrico a Cond. Estándares (Q_G) 25 MMSCFD
 Peso Molecular (PM) 20,61 lb/lb-mol
 Factor de Compresibilidad (z) 0,99
 Viscosidad (μ_G) 0,012 cP

FASE LÍQUIDA

Flujo Volumétrico (Q_L) 3000 BPD
 Densidad (ρ_L) 55,47 lb/ft³
 Gravedad API (°API) °API
 Gravedad Específica (s.g.)

Aceptar Cancelar

Figura D3. Pantalla de Introducción de los Datos Iniciales para el Diseño del Separador Vertical Líquido-Vapor con Malla Eliminadora de Niebla.

Los resultados gráficos que arroja la hoja de cálculo se muestran en la figura D4:

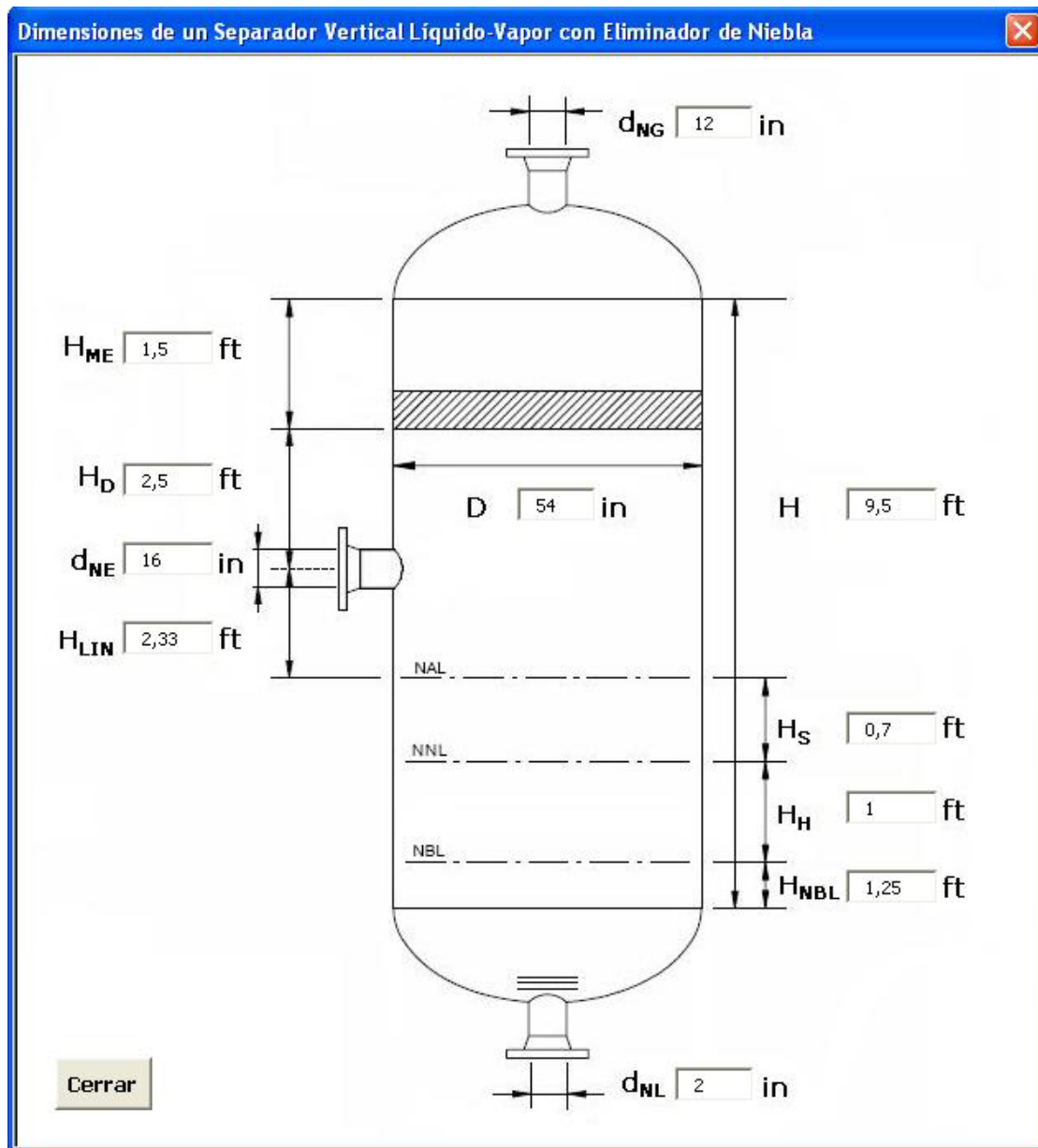


Figura D4. Pantalla de Resultados del Diseño del Separador Vertical Líquido-Vapor con Malla Eliminadora de Niebla.

D.3.- Separador Vertical Líquido-Vapor con Paquete de Aletas en 1

Etapa:

Este separador fue diseñado partiendo de los siguientes datos iniciales:

Selección del Tipo de Separador Bifásico Líquido-Vapor e Introducción de los Datos Iniciales para el Diseño

Vertical con Paquete de Aletas en 2 Etapas | Horizontal sin Eliminador de Niebla | Horizontal con Malla Eliminadora de Niebla
 Vertical sin Eliminador de Niebla | Vertical con Malla Eliminadora de Niebla | Vertical con Paquete de Aletas en 1 Etapa

ESQUEMA

DATOS GENERALES

Presión de Operación (P) 1250 psig

Temperatura de Operación (T) 90 °F

Profundidad de la Caja de Aletas (t_{vb}) 0,98 ft

Parámetro de Flujo en la Cara de las Aletas (θ_v) 0,01

Porcentaje de Margen de Diseño (% Diseño) 25 %

Tiempo de Residencia del Líquido (t_R) 2 min

Altura entre el Nivel Alto de Líquido y el Fondo del Paquete de Aletas (X_1) 1,64 ft

Altura entre el Tope del Paquete de Aletas y la Tangente Superior del Separador (X_2) 0,33 ft

Tensión Interfacial entre el Líquido y el Vapor (σ) 7,52 dinas/cm

FASE VAPOR

Flujo Volumétrico a Cond. Estándares (Q_{G3}) 350 MMSCFD

Peso Molecular (PM) 24,2 lb/lb-mol

Factor de Compresibilidad (z) 0,69

FASE LÍQUIDA

Flujo Volumétrico (Q_L) 2000 BPD

Viscosidad (μ_L) 0,065 cP

Densidad (ρ_L) 30,45 lb/ft³

Gravedad API (*API) °API

Gravedad Específica (s.g)

Figura D5. Pantalla de Introducción de los Datos Iniciales para el Diseño del Separador Vertical Líquido-Vapor con Paquete de Aletas en 1 Etapa.

Los resultados gráficos que arroja la hoja de cálculo se muestran en las figuras D6 y D7:

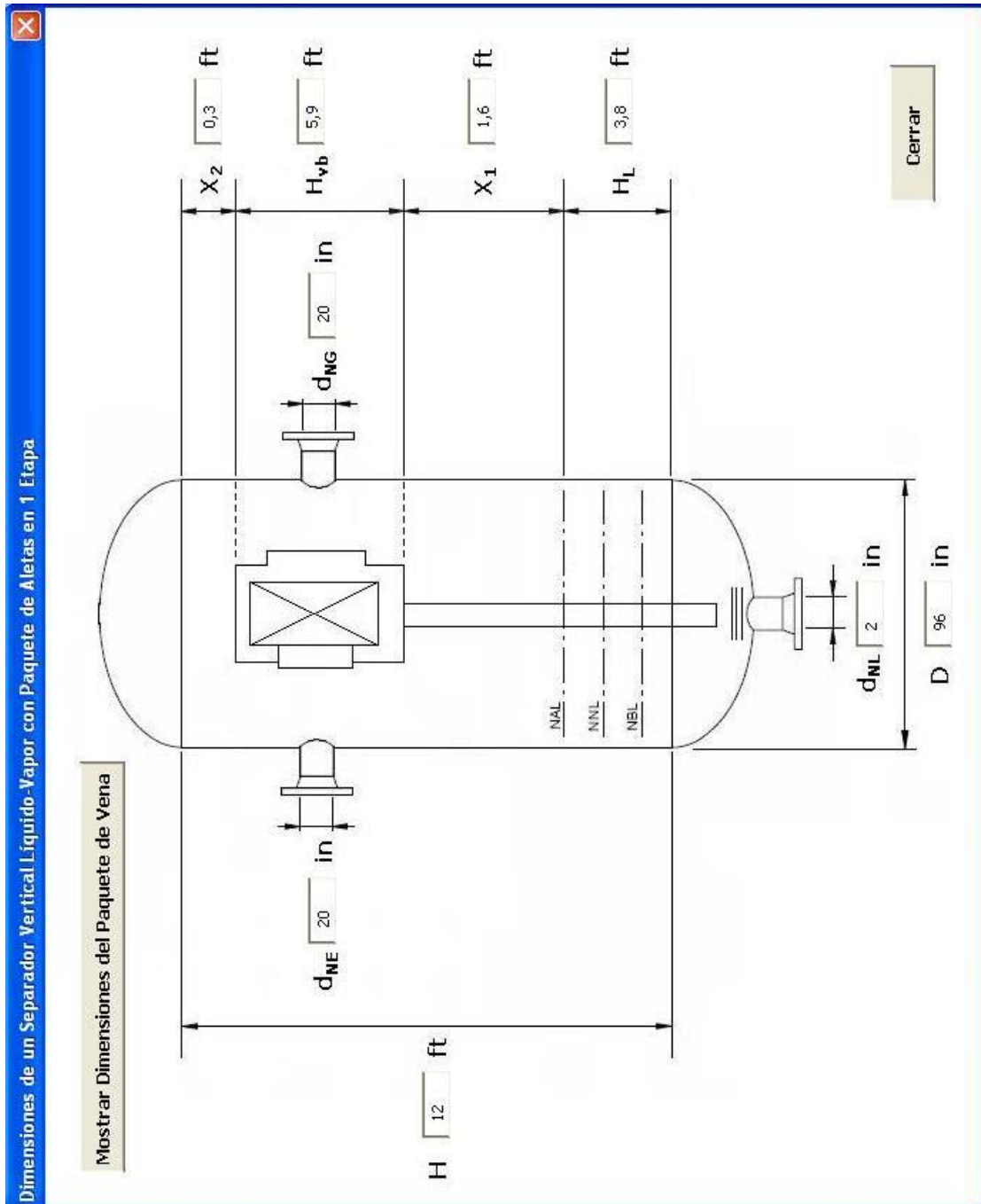


Figura D6. Pantalla de Resultados del Diseño del Separador Vertical Líquido-Vapor con Paquete de Aletas en 1 Etapa.

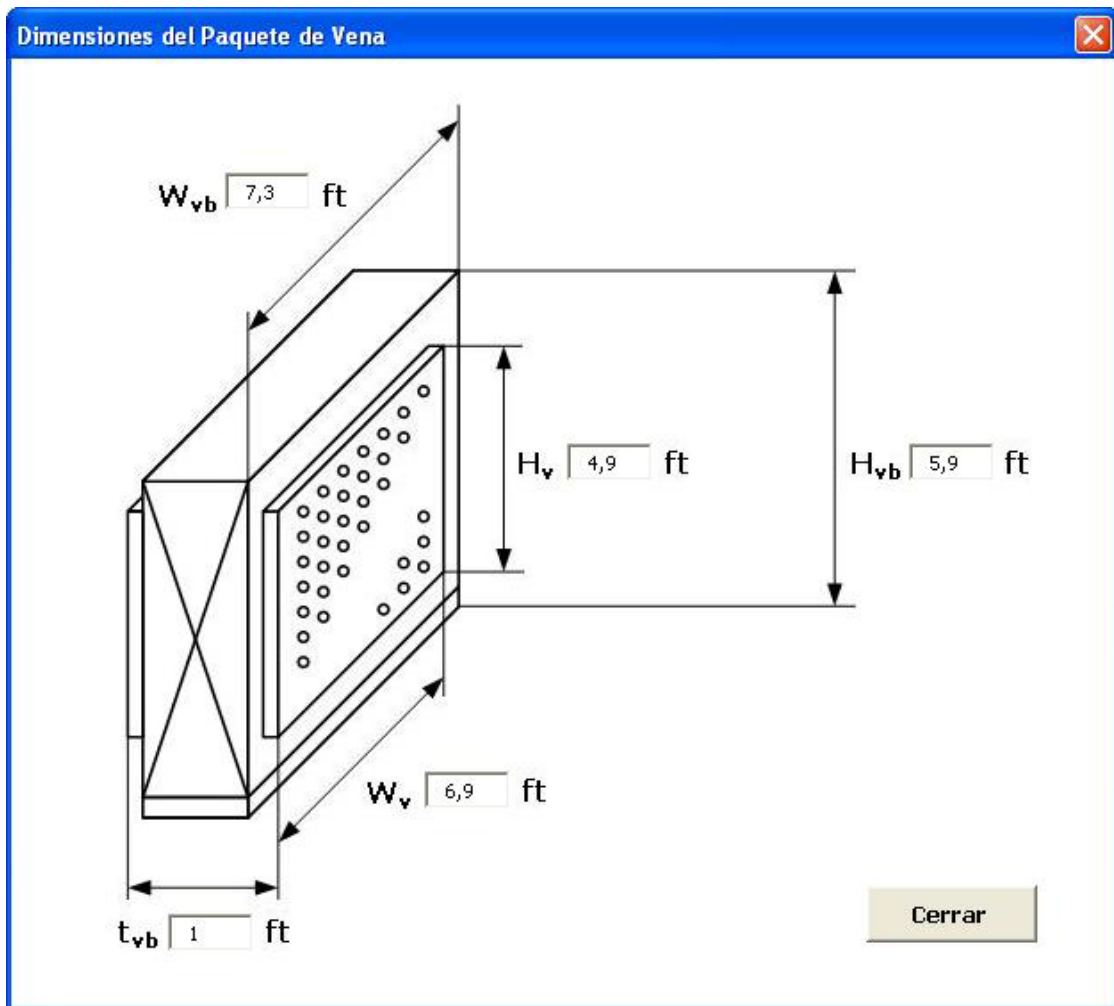


Figura D7. Pantalla de Resultados del Diseño del Paquete de Aletas para el Separador en 1 Etapa.

D.4.- Separador Vertical Líquido-Vapor con Paquete de Aletas en 2

Etapas:

Este separador fue diseñado partiendo de los siguientes datos iniciales:

The screenshot shows a software window titled "Selección del Tipo de Separador Bifásico Líquido-Vapor e Introducción de los Datos Iniciales para el Diseño". It features a tabbed interface with the following sections:

- Navigation Tabs:**
 - Vertical sin Eliminador de Niebla
 - Vertical con Malla Eliminadora de Niebla
 - Vertical con Paquete de Aletas en 1 Etapa
 - Vertical con Paquete de Aletas en 2 Etapas (Selected)
 - Horizontal sin Eliminador de Niebla
 - Horizontal con Malla Eliminadora de Niebla
- ESQUEMA:** A schematic diagram of a vertical separator with a central vertical pipe and a horizontal bundle of blades.
- DATOS GENERALES:**
 - Presión de Operación (P): 800 psig
 - Temperatura de Operación (T): 80 °F
 - Profundidad de la Caja de Aletas (t_{vb}): 0,98 ft
 - Parámetro de Flujo en la Cara de las Aletas (θ_v): 0,01
 - Porcentaje de Margen de Diseño (% Diseño): 25 %
 - Tiempo de Residencia del Líquido (t_R): 2 min
 - Altura entre el Tope del Paquete de Aletas y el Tope del Separador (Y_3): 0,33 ft
 - Tensión Interfacial entre el Líquido y el Vapor (σ): 10 dinas/cm
- FASE VAPOR:**
 - Flujo Volumétrico a Cond. Estándares (Q_{G3}): 137,9 MMSCFD
 - Peso Molecular (PM): 21,76 lb/lb-mol
 - Factor de Compresibilidad (z): 0,98
- FASE LÍQUIDA:**
 - Flujo Volumétrico (Q_L): 3097,6 BPD
 - Viscosidad (μ_L): 2 cP
 - Densidad (ρ_L): 43,7 lb/ft³
 - Gravedad API (°API): [] °API
 - Gravedad Específica (s. g): []
- Buttons:** "Aceptar" and "Cancelar".

Figura D8. Pantalla de Introducción de los Datos Iniciales para el Diseño del Separador Vertical Líquido-Vapor con Paquete de Aletas en 2 Etapas.

Los resultados gráficos que arroja la hoja de cálculo se muestran en las figuras D9 y D10:

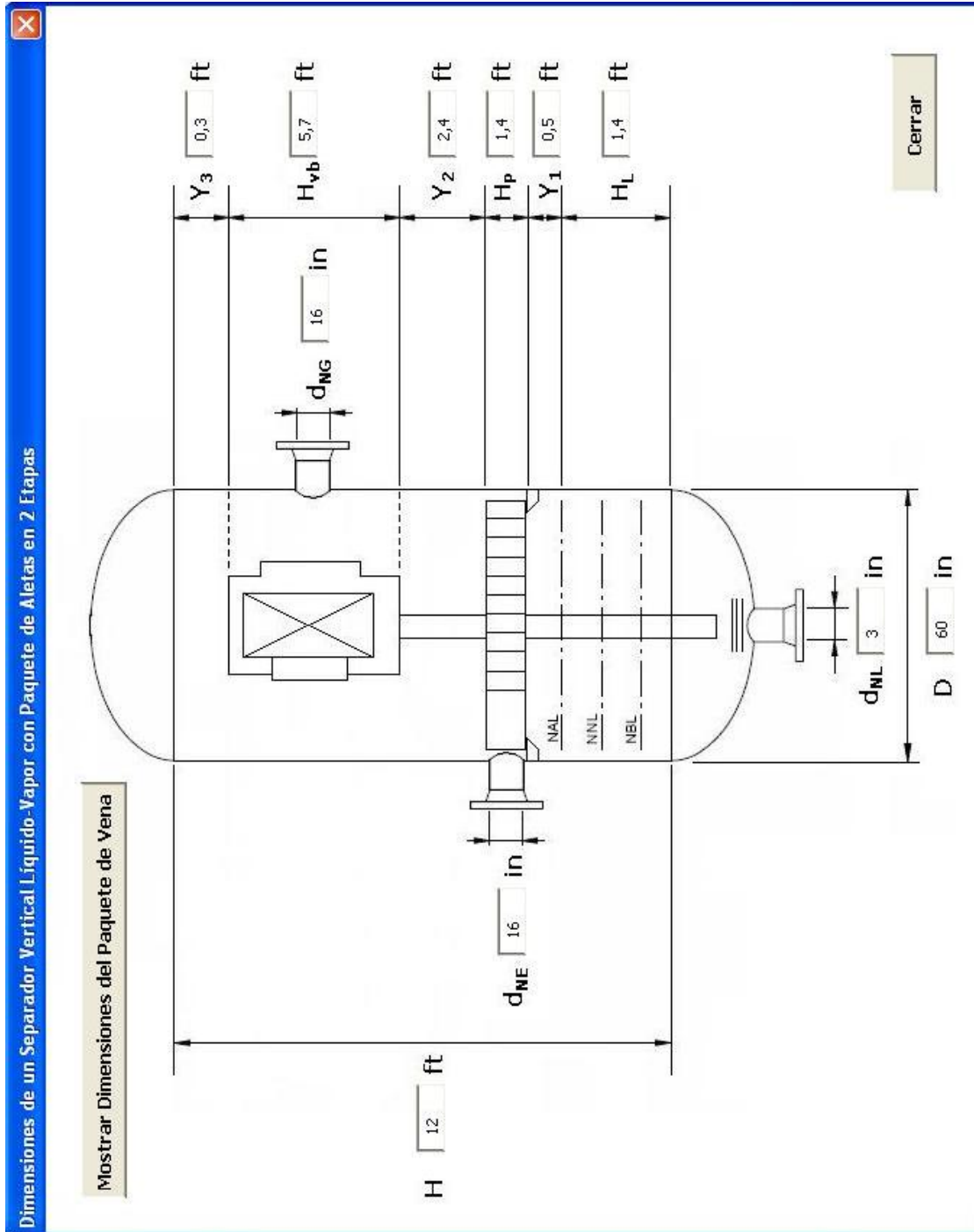


Figura D9. Pantalla de Resultados del Diseño del Separador Vertical Líquido-Vapor con Paquete de Aletas en 2 Etapas.

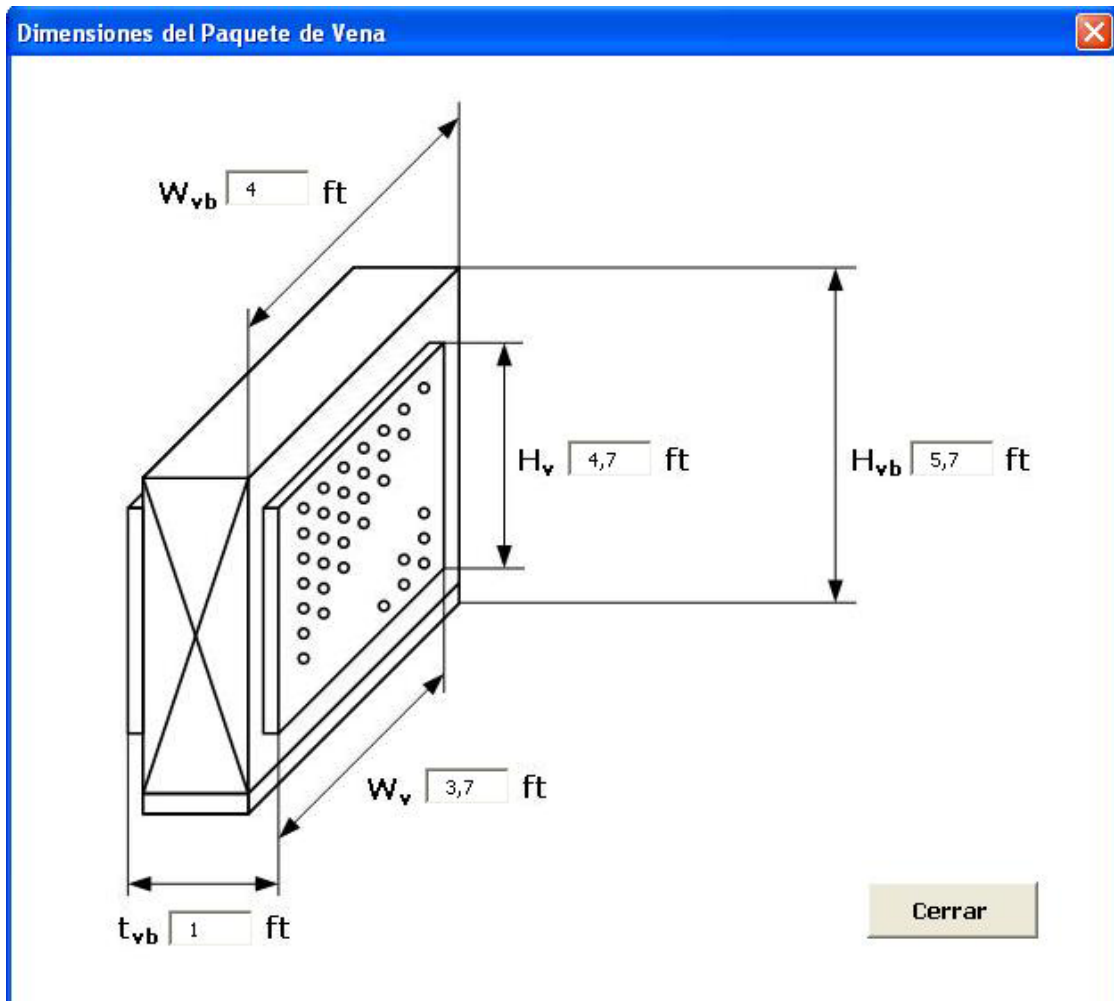


Figura D10. Pantalla de Resultados del Diseño del Paquete de Aletas para el Separador en 2 Etapas.

D.5.- Separador Horizontal Líquido-Líquido-Vapor con Placa:

Este separador fue diseñado partiendo de los siguientes datos iniciales:

The screenshot shows a software window titled "Selección del Tipo de Separador Trifásico Líquido-Líquido-Vapor e Introducción de los Datos Iniciales para el Diseño". It has two tabs: "Horizontal con Placa Decantadora" (selected) and "Horizontal con Bota".

ESQUEMA: A schematic diagram of a horizontal cylindrical separator with a decanting plate. It shows two inlet/outlet ports at the top and two at the bottom.

DATOS GENERALES:

- Presión de Operación (P): 15 psig
- Temperatura de Operación (T): 90 °F
- Tiempo de Holdup (t_H): 3 min
- Tiempo de Surge (t_S): 2 min
- Relación Asumida Longitud-Diámetro del Separador (L/D)_A: 3

DATOS DE LAS FASES INVOLUCRADAS:

Sub-tabs: "Fase Líquida Liviana", "Fase Líquida Pesada", "Fase Vapor".

- Flujo Volumétrico a Cond. Estándares (Q_{GS}): 2 MMSCFD
- Peso Molecular (PM): 37,08 lb/lb-mol
- Factor de Compresibilidad (z): 0,982

¿A partir de que parámetro desea calcular la constante de la velocidad de acentamiento K_s ?

- Diámetro de Partícula (D_p): 127 micrones
- Fases Líquidas a Ser Separadas: [dropdown menu]

Buttons: "Aceptar" and "Cancelar".

Figura D11. Pantalla de Introducción de los Datos Iniciales para el Diseño del Separador Horizontal Líquido-Líquido-Vapor con Placa Decantadora.

Los resultados gráficos que arroja la hoja de cálculo se muestran en la figura D12:

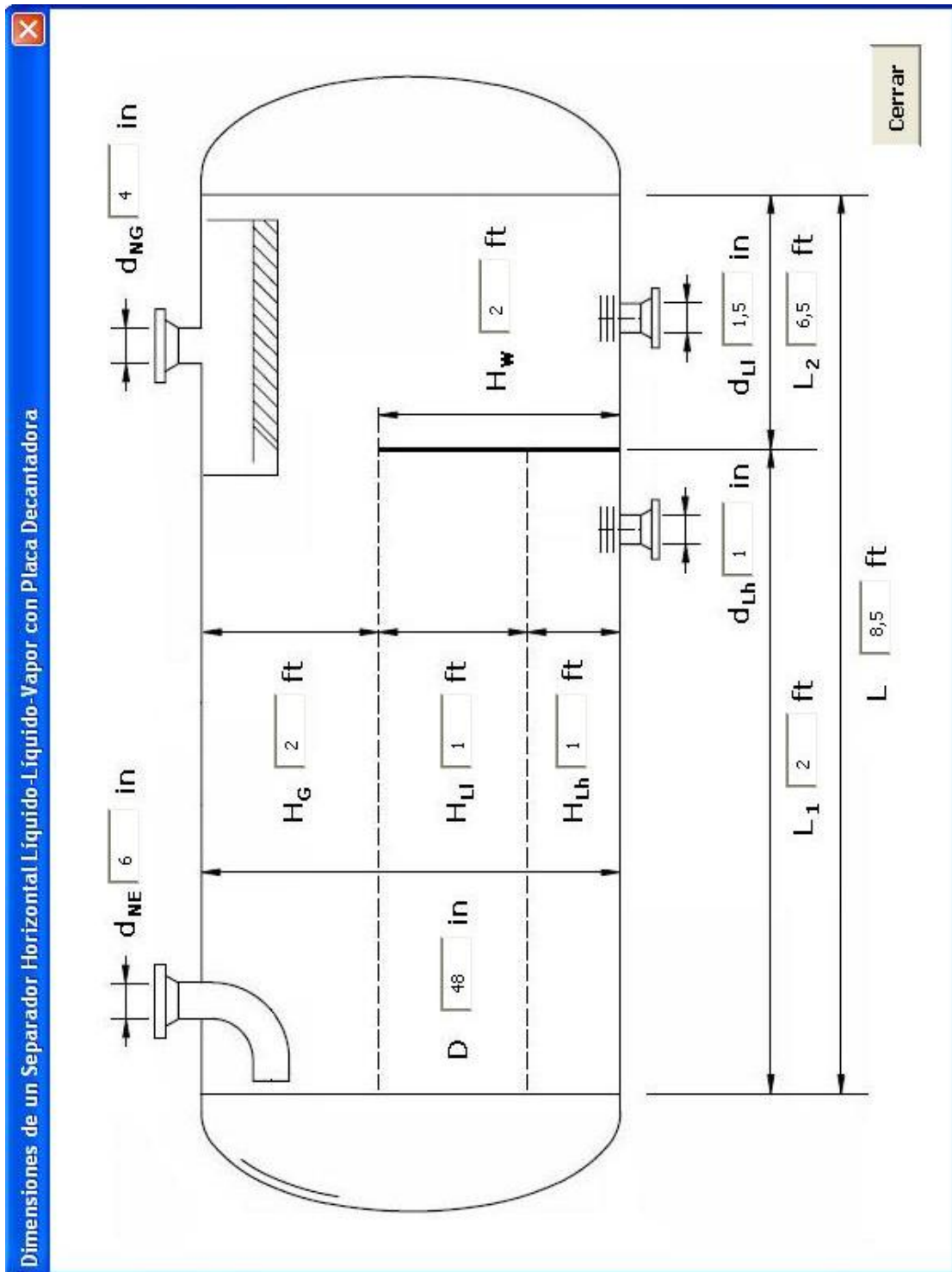


Figura D12. Pantalla de Resultados del Diseño del Separador Horizontal Líquido-Líquido-Vapor con Placa Decantadora.

APÉNDICE E

Cálculos Tipos para el Dimensionamiento de los Separadores de Producción y el Depurador de Gas

Dentro de la siguiente sección se mostrarán los cálculos realizados por el programa para dimensionar los separadores de producción y el depurador de gas.

E.1.- Separador Horizontal Líquido-Vapor con Extractor de Niebla Tipo Malla (Separador de Producción)

El procedimiento de diseño de la hoja de cálculo para este tipo de separador incluye los pasos mencionados a continuación:

Paso 1.- Introducción de los datos mínimos requeridos para llevar a cabo los cálculos del dimensionamiento del separador.

Los datos mínimos requeridos para calcular las dimensiones del separador están reportados en la tabla 3.

Inmediato a la introducción de los datos iniciales el programa deberá efectuar el cambio de unidades correspondiente para efectuar los cálculos posteriores:

$$P(\text{psia}) = P(\text{psig}) + 14,7 \quad \Rightarrow \quad P(\text{psia}) = 60 + 14,7 = 74,7 \text{ psia}$$

$$T(^{\circ}R) = T(^{\circ}F) + 460 \quad \Rightarrow \quad T(^{\circ}R) = 121 + 460 = 581^{\circ}R$$

$$Q_L \left(\frac{ft^3}{s} \right) = \frac{Q_L(BPD) \cdot 42 \cdot 0,13368}{24 \cdot 3600} \quad \Rightarrow$$

$$Q_L \left(\frac{ft^3}{s} \right) = \frac{72153,65 \cdot 42 \cdot 0,13368}{24 \cdot 3600} = 4,689 \frac{ft^3}{s}$$

Paso 2.- Determinación de la densidad de la fase gas.

$$\rho_G = \frac{P \cdot PM}{z \cdot 10,73 \cdot T} \quad \Rightarrow \quad \rho_G \left(\frac{lb}{ft^3} \right) = \frac{74,7 \cdot 20,61}{0,99 \cdot 10,73 \cdot 581} = 0,249 \frac{lb}{ft^3}$$

Paso 3.- Determinación del flujo volumétrico de vapor a las condiciones actuales.

$$Q_{GA} = \frac{Q_{GS} \cdot 10E^{+6} \cdot PM}{379,49 \cdot 86400 \cdot \rho_G} \Rightarrow$$

$$Q_{GA} \left(\frac{ft^3}{s} \right) = \frac{12,3 \cdot 10E^{+6} \cdot 20,61}{379,49 \cdot 86400 \cdot 0,249} = 30,99 \frac{ft^3}{s}$$

Paso 4.- Determinación de la velocidad de vapor a partir de su velocidad crítica.

$$\text{Para: } 40 \leq P(\text{psia}) \leq 5500 \Rightarrow K = 0,430 - 0,023 \cdot \ln(P) \Rightarrow$$

$$K \left(\frac{ft}{s} \right) = 0,430 - 0,023 \cdot \ln(74,7) = 0,331 \frac{ft}{s}$$

$$U_c = K \cdot \sqrt{\frac{(\rho_L - \rho_G)}{\rho_G}} \Rightarrow U_c \left(\frac{ft}{s} \right) = 0,331 \cdot \sqrt{\frac{(58,679 - 0,249)}{0,249}} = 5,063 \frac{ft}{s}$$

$$U_G = U_c \Rightarrow U_G \left(\frac{ft}{s} \right) = 5,063 \frac{ft}{s}$$

Paso 5.- Determinación del volumen de almacenamiento o volumen de Holdup.

$$V_H = t_H \cdot Q_L \cdot 60 \Rightarrow V_H (ft^3) = 4 \cdot 4,689 \cdot 60 = 1125,3 ft^3$$

Paso 6.- Determinación del volumen de oleaje o volumen de Surge.

$$V_S = t_S \cdot Q_L \cdot 60 \Rightarrow V_S (ft^3) = 3 \cdot 4,689 \cdot 60 = 844 ft^3$$

Paso 7.- Determinación del diámetro del recipiente.

$$D = \left(\frac{4 \cdot (V_H + V_S)}{\pi \cdot 0,6 \cdot \left(\frac{L}{D} \right)_A} \right)^{\frac{1}{3}} \Rightarrow D(ft) = \left(\frac{4 \cdot (1125,3 + 844)}{3,1416 \cdot 0,6 \cdot 4,3} \right)^{\frac{1}{3}} \cong 10 ft$$

Paso 8.- Determinación del área de la sección transversal del separador

$$A_T = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \Rightarrow A_T (ft^2) = \frac{3,1416 \cdot (10)^2}{4} = 78,5 ft^2$$

Paso 9.- Selección de la altura de líquido desde la línea tangente inferior del separador hasta el nivel bajo.

$$H_{NBL} = \frac{0,5 \cdot D + 7}{12} \Rightarrow H_{NBL}(ft) = \frac{0,5 \cdot 10 + 7}{12} = 1ft$$

Paso 10.- Determinación del área correspondiente al ocupado por el nivel bajo de líquido.

$$x = \frac{H_{NBL}}{D} \Rightarrow x = \frac{1}{10} = 0,1$$

$$y = \frac{4,7559E^{-5} + 0,1749 \cdot x + 5,6690 \cdot x^2 - 4,9164 \cdot x^3 - 0,1453 \cdot x^4}{1 + 3,9241 \cdot x - 6,3588 \cdot x^2 + 4,0184 \cdot x^3 - 1,8017 \cdot x^4} \Rightarrow$$

$$y = \frac{4,7559E^{-5} + 0,1749 \cdot 0,1 + 5,6690 \cdot (0,1)^2 - 4,9164 \cdot (0,1)^3 - 0,1453 \cdot (0,1)^4}{1 + 3,9241 \cdot 0,1 - 6,3588 \cdot (0,1)^2 + 4,0184 \cdot (0,1)^3 - 1,8017 \cdot (0,1)^4} = 0,052$$

$$y = \frac{A_{NBL}}{A_T} \Rightarrow A_{NBL} = y \cdot A_T \Rightarrow A_{NBL}(ft^2) = 0,052 \cdot 78,5 = 4,1ft^2$$

Paso 11.- Determinación de la altura ocupada por la fase vapor.

$$H_G = 0,2 \cdot D \Rightarrow H_G(ft) = 0,2 \cdot 10 = 2ft$$

Paso 12.- Determinación del área ocupado por la fase vapor.

$$x = \frac{H_G}{D} \Rightarrow x = \frac{2}{10} = 0,2$$

$$y = \frac{4,7559E^{-5} + 0,1749 \cdot x + 5,6690 \cdot x^2 - 4,9164 \cdot x^3 - 0,1453 \cdot x^4}{1 + 3,9241 \cdot x - 6,3588 \cdot x^2 + 4,0184 \cdot x^3 - 1,8017 \cdot x^4} \Rightarrow$$

$$y = \frac{4,7559E^{-5} + 0,1749 \cdot 0,2 + 5,6690 \cdot (0,2)^2 - 4,9164 \cdot (0,2)^3 - 0,1453 \cdot (0,2)^4}{1 + 3,9241 \cdot 0,2 - 6,3588 \cdot (0,2)^2 + 4,0184 \cdot (0,2)^3 - 1,8017 \cdot (0,2)^4} = 0,142$$

$$y = \frac{A_G}{A_T} \Rightarrow A_G = y \cdot A_T \Rightarrow A_G (ft^2) = 0,142 \cdot 78,5 = 11,2 ft^2$$

Paso 13.- Determinación de la longitud del separador.

$$L = \frac{V_H + V_S}{A_T - A_G - A_{NBL}} \Rightarrow L(ft) = \frac{1125,3 + 844}{78,5 - 11,2 - 4,1} = 31,1 ft \cong 31,5 ft$$

Paso 14.- Determinación del tiempo requerido para la separación de las gotas de líquido de la fase vapor

$$\phi = \frac{H_G}{U_G} \Rightarrow \phi(s) = \frac{2}{5,063} = 0,4s$$

Paso 15.- Determinación de la velocidad actual de vapor

$$U_{GA} = \frac{Q_{GA}}{A_G} \Rightarrow U_{GA} \left(\frac{ft}{s} \right) = \frac{30,99}{11,2} = 2,77 ft/s$$

Paso 16.- Determinación de la longitud mínima requerida para la separación líquido-vapor

$$L_{MIN} = U_{GA} \cdot \phi \Rightarrow L_{MIN}(ft) = 2,77 \cdot 0,4 = 1,1 ft$$

Se cumple la condición de diseño: $L \geq L_{MIN} \Rightarrow 31,5 \geq 1,1$

Paso 17.- Determinación del área transversal correspondiente al nivel normal de líquido

$$A_{NNL} = A_{NBL} + \frac{V_H}{L} \Rightarrow A_{NNL}(ft^2) = 4,1 + \frac{1125,3}{31,5} = 39,8 ft^2$$

Paso 18.- Determinación de la altura correspondiente al nivel normal de líquido

$$x = \frac{A_{NNL}}{A_T} \Rightarrow x = \frac{39,8}{78,5} = 0,507$$

$$y = \frac{1,537E^{-3} + 3,299 \cdot x + 24,354 \cdot x^2 - 36,999 \cdot x^3 + 9,893 \cdot x^4}{1 + 26,787 \cdot x - 22,924 \cdot x^2 - 14,845 \cdot x^3 + 10,529 \cdot x^4} \Rightarrow$$

$$y = \frac{1,537E^{-3} + 3,299 \cdot 0,507 + 24,354 \cdot (0,507)^2 - 36,999 \cdot (0,507)^3 + 9,893 \cdot (0,507)^4}{1 + 26,787 \cdot 0,507 - 22,924 \cdot (0,507)^2 - 14,845 \cdot (0,507)^3 + 10,529 \cdot (0,507)^4} = 0,505$$

$$y = \frac{H_{NNL}}{D} \Rightarrow H_{NNL} = y \cdot D \Rightarrow H_{NNL}(ft) = 0,505 \cdot 10 = 5,1ft$$

Paso 19.- Determinación de la altura correspondiente al nivel alto de líquido

$$H_{NAL} = D - H_G \Rightarrow H_{NAL}(ft) = 10 - 2 = 8ft$$

E.2.- Separador Vertical Líquido-Vapor con Extractor de Niebla Tipo Malla (Depurador de Gas)

El procedimiento de diseño de la hoja de cálculo para este tipo de separador incluye los pasos mencionados a continuación:

Paso 1.- Introducción de los datos mínimos requeridos para llevar a cabo los cálculos del dimensionamiento del separador.

Los datos mínimos requeridos para calcular las dimensiones del separador están reportados en la tabla 3.

Inmediato a la introducción de los datos iniciales el programa deberá efectuar el cambio de unidades correspondiente para efectuar los cálculos posteriores:

$$P(psia) = P(psig) + 14,7 \Rightarrow P(psia) = 40 + 14,7 = 54,7 psia$$

$$T(^{\circ}R) = T(^{\circ}F) + 460 \Rightarrow T(^{\circ}R) = 122 + 460 = 582^{\circ}R$$

$$Q_L \left(\frac{ft^3}{s} \right) = \frac{Q_L(BPD) \cdot 42 \cdot 0,13368}{24 \cdot 3600} \Rightarrow$$

$$Q_L \left(\frac{ft^3}{s} \right) = \frac{3000 \cdot 42 \cdot 0,13368}{24 \cdot 3600} = 0,195 \frac{ft^3}{s}$$

Paso 2.- Determinación de la densidad de la fase gas.

$$\rho_G = \frac{P \cdot PM}{z \cdot 10,73 \cdot T} \Rightarrow \rho_G \left(\frac{lb}{ft^3} \right) = \frac{54,7 \cdot 20,61}{0,99 \cdot 10,73 \cdot 582} = 0,182 \frac{lb}{ft^3}$$

Paso 3.- Determinación del flujo volumétrico de vapor a las condiciones actuales.

$$Q_{GA} = \frac{Q_{GS} \cdot 10E^{+6} \cdot PM}{379,49 \cdot 86400 \cdot \rho_G} \Rightarrow$$

$$Q_{GA} \left(\frac{ft^3}{s} \right) = \frac{25 \cdot 10E^{+6} \cdot 20,61}{379,49 \cdot 86400 \cdot 0,182} = 86,18 \frac{ft^3}{s}$$

Paso 4.- Determinación de la velocidad de vapor a partir de su velocidad crítica.

$$\text{Para: } 40 \leq P(\text{psia}) \leq 5500 \Rightarrow K = 0,430 - 0,023 \cdot \ln(P) \Rightarrow$$

$$K \left(\frac{ft}{s} \right) = 0,430 - 0,023 \cdot \ln(54,7) = 0,338 \frac{ft}{s}$$

$$U_C = K \cdot \sqrt{\frac{(\rho_L - \rho_G)}{\rho_G}} \Rightarrow U_C \left(\frac{ft}{s} \right) = 0,338 \cdot \sqrt{\frac{(55,47 - 0,182)}{0,182}} = 5,885 \frac{ft}{s}$$

$$U_G = U_C \Rightarrow U_G \left(\frac{ft}{s} \right) = 5,885 \frac{ft}{s}$$

Paso 5.- Determinación del diámetro del recipiente.

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{GA}}{\pi \cdot U_G}} \Rightarrow D(ft) = \sqrt{\frac{4 \cdot 86,18}{\pi \cdot 5,885}} = 4,3 ft \cong 4,5 ft$$

Paso 6.- Determinación del volumen de almacenamiento o volumen de Holdup.

$$V_H = t_H \cdot Q_L \cdot 60 \Rightarrow V_H (ft^3) = 1 \cdot 0,195 \cdot 60 = 11,7 t^3$$

Paso 7.- Determinación del volumen de oleaje o volumen de Surge.

$$V_S = t_S \cdot Q_L \cdot 60 \Rightarrow V_S (ft^3) = 1 \cdot 0,195 \cdot 60 = 11,7 ft^3$$

Paso 8.- Selección de la altura de líquido desde la línea tangente inferior del separador hasta el nivel bajo.

Para una presión de operación menor a 300 *psia* y un diámetro del separador menor a 10 *ft*, el valor de H_{NBL} será de 1,3 *ft*.

Paso 9.- Determinación de la altura de Holdup.

$$H_H = \frac{V_H}{\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot D^2} \Rightarrow H_H (ft) = \frac{11,7}{\left(\frac{3,1416}{4}\right) \cdot (4,5)^2} = 0,7$$

Cumpliendo con la condición de: $H_H \geq 1ft \Rightarrow H_H (ft) = 0,7ft \cong 1ft$

Paso 10.- Determinación de la altura de Surge.

$$H_S = \frac{V_S}{\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot D^2} \Rightarrow H_S (ft) = \frac{11,7}{\left(\frac{3,1416}{4}\right) \cdot (4,5)^2} = 0,7$$

Cumpliendo con la condición de: $H_S \geq 0,5ft \Rightarrow H_H (ft) = 0,7ft$

Paso 11.- Determinación de la boquilla de alimentación al separador

$$Q_M = Q_{GA} + Q_L \Rightarrow Q_M \left(\frac{ft^3}{s} \right) = 86,18 + 0,195 = 86,37 \frac{ft^3}{s}$$

$$\lambda = \frac{Q_L}{Q_M} \Rightarrow \lambda = \frac{0,195}{86,37} = 2,258E^{-3}$$

$$\rho_M = \rho_L \cdot \lambda + \rho_G \cdot (1 - \lambda) \Rightarrow$$

$$\rho_M \left(\frac{lb}{ft^3} \right) = 55,47 \cdot 2,258E^{-3} + 0,182 \cdot (1 - 2,258E^{-3}) = 0,307 \frac{lb}{ft^3}$$

$$U_{NE} = \frac{60}{\sqrt{\rho_M}} \Rightarrow U_{NE} \left(\frac{ft}{s} \right) = \frac{60}{\sqrt{0,307}} = 108,26 \frac{ft}{s}$$

$$d_{NE} = 12 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot Q_M}{\pi \cdot U_{NE}}} \Rightarrow d_{NE} (in) = 12 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 86,37}{3,1416 \cdot 108,26}} = 12,1in$$

Llevando el diámetro al siguiente valor comercial más próximo, tenemos:

$$d_{NE}(in) = 12,1in \cong 16in$$

Paso 12.- Determinación de la altura desde el nivel alto de liquido hasta la línea central de la boquilla de entrada

Suponiendo que el recipiente posee un deflector en la boquilla de entrada, la altura será determinada mediante la siguiente ecuación:

$$H_{LIN} = \frac{12 + d_{NE}}{12} \Rightarrow H_{LIN}(ft) = \frac{12 + 16}{12} = 2,3ft$$

Paso 13.- Determinación de la altura desde la línea central de la boquilla de entrada hasta la línea de fondo del extractor de niebla.

$$H_D = 0,5 \cdot D \Rightarrow H_D(ft) = 0,5 \cdot 4,5 = 2,25ft$$

Se debe cumplir la condición de diseño:

$$H_D \geq \frac{36 + \frac{d_{NE}}{2}}{12} \Rightarrow H_D(ft) \geq \frac{36 + \frac{16}{2}}{12} = 3,7ft \Rightarrow H_D(ft) = 2,25ft \cong 3,7ft$$

Paso 14.- Determinación de la altura desde la línea de fondo del extractor de niebla hasta la tangente superior del separador.

Por recomendación el valor tomado por el programa es:

$$H_{ME}(ft) = 1,5ft$$

Paso 15.- Determinación de la altura del recipiente

$$H = H_{NBL} + H_H + H_S + H_{LIN} + H_D + H_{ME} \Rightarrow H(ft) = 1,3 + 1 + 0,7 + 2,3 + 3,7 + 1,5 = 10,5ft$$

CAPÍTULO IX: Anexos

Design Two-Phase Separators Within the Right Limits

Here is a proven, step-by-step method.

Liquid/vapor separators are one of the most common types of process equipment. Many technical papers have been written on separator design and vast amounts of information are also available in corporate process engineering design guidelines. The basic equations used for sizing are widely known; however, subjectivity exists during the selection of the parameters used in these equations. This article attempts to address the basics of two-phase separator design and provide step-by-step procedures and examples for two-phase vapor/liquid separator design.

Two-phase separator types and selection

Two-phase separators may be oriented either vertically or horizontally. In some cases, it may be necessary to compare both designs to determine which is more economic. Separators may be designed with or without mist eliminator pads and may also have inlet diverters. Some separators may have proprietary impingement or settling internals. The vendor should be contacted to design these types of vessels. Vertical vapor/liquid separators are preferred for separating liquid from mixtures with a high vapor/liquid ratio while horizontal separators are preferred for separating vapor from mixtures with a low vapor/liquid ratio.

*Verticals less \$ - Ptd space may be a factor
- Depends on required liquid inventory
Background (on reflux drums horizontal)*

Vapor/liquid separation is usually accomplished in three stages. The first

stage, primary separation, uses an inlet diverter so that the momentum of the liquid entrained in the vapor causes the largest droplets to impinge on the diverter and then drop by gravity. The next stage, secondary separation, is gravity separation of smaller droplets as the vapor flows through the disengagement area. The final stage is mist elimination where the smallest droplets are coalesced so that larger droplets are formed which will separate by gravity.

For secondary separation, the allowable velocity must be calculated so that disengagement area can be subsequently determined. Performing a force balance on the liquid droplet settling out provides the necessary relationship. When the net gravity force, given by Eq. 1,

$$F_G = \frac{M_p (\rho_L - \rho_V) g}{g_c} \quad (1)$$

balances the drag force, given by Eq. 2,

$$F_D = \frac{(\pi / 8) C_D D_p^2 U_V^2 \rho_V}{g_c} \quad (2)$$

the heavier liquid droplets will settle at a constant terminal velocity, U_T . Equating Eqs. 1 and 2 results in,

$$U_T = \sqrt{\frac{4g D_p (\rho_L - \rho_V)}{3C_D \rho_V}} \quad (3)$$

Hence, as long as $U_V < U_T$, the liquid droplets will settle out. Typically, the allowable vertical velocity, U_V , is set

W.Y. Svrcek, W.D. Monnery
University of Calgary

between $0.75U_T$ and U_T . Eq. 3 can be rearranged as Eq. 4, a Sauders-Brown type equation (1):

$$U_i = K \sqrt{\frac{(\rho_L - \rho_V)}{\rho_V}} \quad (4)$$

where

$$\text{where } K = \sqrt{\frac{4gD_p}{3C_D}} \quad (5)$$

Practically, very small droplets cannot be separated by gravity alone. These droplets are coalesced to form larger droplets which will settle by gravity. Coalescing devices in separators force the gas to follow a tortuous path and the momentum of the droplets causes them to collide with other droplets or the coalescing device, forming larger droplets. The coalesced droplet diameter is not ade-

When calculating U_T for a horizontal separator, a "no mist eliminator K value" should be used.

quately predictable so the K values for mist eliminators are typically empirical. This is where subjectivity first enters separator design. There are several literature sources of K values such as the Gas Processor's Supplier Association (GPSA) "Engineering Data Book" (2), numerous technical publications and vendor's recommendations. The GPSA (2) and York Mist Eliminator (3) val-

ues have been curve fitted and are given in Table 1.

If there is no mist eliminator, it is recommended to use one half of the above values (2) or the "theoretical" value K can be calculated from Eq. 5 if the liquid droplet size is known. The drag coefficient, C_D , has been curve fitted and is given in Table 1 or can be obtained from Figure 7-3 in the GPSA "Engineering Data Book" (2).

Before proceeding, it is worthwhile to clarify some definitions and criteria. Holdup is defined as the time it takes to reduce the liquid level from normal (NLL) to empty (LLL) while maintaining a normal outlet flow without feed makeup. Surge time is defined as the time it takes for the liquid level to rise from normal (NLL) to maximum (HLL) while maintaining a normal feed without any outlet flow. Some guidelines base "surge" on the volume between low (LLL) and high (HLL) liquid levels. Holdup time is based on the reserve required to maintain good control and safe operation of downstream facilities. Surge time is usually based on requirements to accumulate liquid as a result of upstream or downstream variations or upsets, for example, slugs. In the absence of specific requirements, surge time may be taken as one half of holdup time.

Vertical separators. For vertical separators, the vapor disengagement area is the entire cross-sectional area of the vessel so that vapor disengagement diameter can be calculated from Eq. 6:

$$D_{VD} = \sqrt{\frac{4Q_V}{\pi U_V}} \quad (6)$$

Technically, this is the mist eliminator diameter and the inside diameter of the vessel must be slightly larger so that the mist eliminator can be installed inside the vessel. Typically, the calculated value is taken up to the next six in. This value is taken as the required diameter of the vessel, D , and the corresponding cross-sectional area, A , is calculated using this diameter.

The next step in sizing a vertical separator is to determine the height.

Table 1. Separator K values.

Mist Eliminator			
$1 \leq P < 15$	$K = 0.1821 + 0.0029P + 0.0460 \ln(P)$		Chem Eng
$15 \leq P < 40$	$K = 0.35$	$P, \text{ psia}$	Nb/dec
$40 \leq P \leq 5,500$	$K = 0.430 - 0.023 \ln(P)$		93
GPSA	$K = 0.35 - 0.0001(P - 100)$		York
$0 \leq P \leq 1,500$	$K = 0.36 - 0.01(P - 100/100)$	$P, \text{ psig}$	
<ul style="list-style-type: none"> • Most vapors under vacuum $K = 0.20$. • For glycol and amine solutions, multiply K by 0.6-0.8. • For vertical vessels without mist eliminators, divide K by 2. • For compressor suction scrubbers, mole sieve scrubbers and expander inlet separators multiply K by 0.7-0.8. 			
Theoretical (no mist eliminator)			
$K = \sqrt{\frac{4gD_p}{3C_D}}$			
$C_D = \exp(Y) \quad C_D = 5.0074/\ln(X) + 40.927/\sqrt{X} + 484.07/X$			
$Y = 8.411 - 2.243X + 0.273X^2 - 1.865E - 2X^3 + 5.201E - 4X^4$			
$X = \ln\left(\frac{0.95 + 80D_p D_i^3 (\rho_L - \rho_V)}{\mu_V^2}\right)$			
<p>Notes:</p> <p>$D_p, \text{ ft}$ 0.95×10^3</p> <p>$\rho, \text{ lb/ft}^3$</p> <p>$\mu, \text{ cP}$</p> <p>1 micron = $3.28084 \times 10^{-6} \text{ ft}$</p>			

Integrated vel - 3 in/s for
high velocity scrubbers

For a two-phase vertical separator, the total height can be broken into sections, as shown in Figure 1. The separator height is then calculated by adding the heights of these sections, as per Eq. 7.

$$H_T = H_{LLL} + H_H + H_S + H_{LIN} + H_D \quad (7)$$

If a mist eliminator pad is used, additional height is added, as shown in Figure 1. The calculations of diameter and height are detailed in the "Design Procedures" section of this article.

Horizontal separators. For horizontal two-phase separators, the cross-section is occupied by both vapor and liquid, as shown in Figure 2. When sizing horizontal two-phase separators, usually a diameter is assumed, *LLL* is selected or calculated, *NLL* is set by liquid holdup, and *HLL* is set by liquid surge. The cross-sectional area between *HLL* and the top of the vessel is used for vapor disengagement. The length of the vessel is then calculated to accommodate holdup and surge or to facilitate vapor liquid separation. Hence, this approach to sizing horizontal separators, or variations of it, are iterative calculations.

The following will develop the basic equation used for calculating the size of a horizontal separator. For a horizontal separator cross section, a "volume balance" is written.

$$V_H + V_S = L (A_T - A_{VD} - A_{LLL}) \quad (8)$$

Holdup and surge volumes are calculated from holdup and surge times which are selected according to guidelines. The low liquid level area is a function of the low liquid level height, obtained from guidelines, and the vessel inside diameter. The minimum vapor disengagement area, A_{VD} , is typically specified as one to two ft or 20% of the vessel inside diameter, whichever is greater. The sizing method in the "Design Procedures" section of this article assumes this for A_{VD} and only increases it if the length

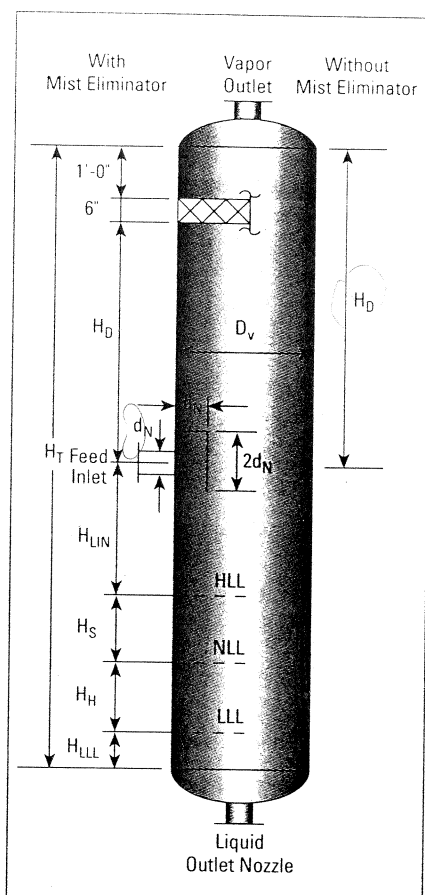


Figure 1. Vertical two-phase separator.

required for vapor-liquid separation is much greater than the length required for holdup and surge, for a given diameter. Equation 8 is then a function of the inside diameter, *D*, and length, *L*.

For horizontal separators, the liquid droplet to be separated from the gas has a horizontal drag force which is not directly opposite to gravity as in the vertical case. Without detailed treatment of two-dimensional particle motion, most literature sources recognize that the allowable horizontal velocity can be higher than the terminal velocity (2, 5, 7). This can be

If a mist eliminator pad is used, additional height is added.

shown simply by equating the "residence" times of the liquid droplet to be settled. That is, the time it takes to travel the horizontal length between inlet and outlet must be greater than the time it takes to settle the vertical distance to the liquid surface.

$$\frac{L}{U_{AH}} \geq \frac{H_V}{U_T} \quad (9)$$

This can be rearranged in terms of the allowable horizontal velocity.

$$U_{AH} \leq \frac{L}{H_V} U_T \quad (10)$$

The length, *L*, divided by the height of the vapor disengagement area, H_V , would always be greater than unity. The allowable horizontal velocity is a very subjective topic with several empirical approaches to modify the vertical "K" value available in the literature (2, 5, 7, 8). For horizontal separator design, the subsequent design procedures use a "droplet settling approach" similar to the API procedure (6) which does not require empirical modification of the "K" value for vertical settlers. It should be noted that when calculating U_T for a horizontal separator, a "no mist eliminator K value" should be used.

Design Procedures

The following design procedures and heuristics are a result of a review of literature sources and accepted industrial design guidelines. The horizontal design procedure incorporates optimizing the diameter and length by minimizing the weight of the shell and heads. To add a degree of conservatism to the design, the volume available in the heads is ignored.

Vertical design procedure (See Figure 1):

1. Calculate the vertical terminal vapor velocity:

$$U_T = K \left(\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V} \right)^{1/2}, \text{ ft/s} \quad (11)$$

Set $U_V = 0.75 U_T$ for a conservative design. Calculate the *K* value from Table 1.

Nomenclature

- A = vertical vessel cross-sectional Area, ft²
- A_{III} = cross section For LLL (horizontal vessel), ft²
- A_T = total cross sectional area (horizontal vessel), ft²
- A_{VD} = vapor disengagement area required, ft²
- C_D = drag coefficient
- D = vessel diameter, ft or in.
- D_p = droplet diameter, ft.
- D_v = nozzle diameter, in. (inlet or outlet vapor/liquid as specified)
- D_{VD} = vapor disengagement diameter, ft
- E = welded joint efficiency
- F_D = drag force, lb_f
- F_G = gravity force, lb_f
- g = gravitational constant, 32.17 ft/s²
- g_c = 32.17 (lbm/ft)/(lb_f-s²)
- H_D = disengagement height, ft
- H_H = holdup height, ft
- H_{LNS} = H_{LL} to inlet nozzle centerline height, ft
- HLL = high liquid level
- H_{LLL} = low Liquid Level height, ft
- H_{ME} = mist eliminator to top tank height, ft
- H_S = surge height, ft
- H_T = total vertical separator height, ft
- H_V = vapor disengagement area height, ft
- K = terminal velocity constant, ft/s
- L = vessel length, ft
- LLL = low liquid level
- L_{MIN} = vapor/liquid separation minimum length, ft
- M_p = droplet mass, lb_f
- NLL = normal liquid level
- P = pressure, psig or psia
- Q_L = liquid volumetric flow, ft³/min
- Q_M = mixture volumetric flow, ft³/s, ft³/min
- Q_V = vapor volumetric flow, ft³/s, ft³/min
- S = vessel material stress value, psi
- T_H = holdup time, min.
- t_h = head thickness, in
- t_s = shell thickness, in
- U_{AH} = allowable horizontal velocity, ft/s
- U_T = terminal velocity, ft/s
- U_m = mixture velocity, ft/s
- U_v = vapor velocity, ft/s
- V_H = holdup volume, ft³
- V_{LLL} = LLL volume, ft³
- V_S = surge volume, ft³
- V_T = total volume (horizontal vessel), ft³
- W = vessel weight, lb_m

Greek Letters

- λ = mixture liquid fraction
- μ_v = vapor viscosity, cP
- ρ_L = liquid density, lb/ft³
- ρ_M = mixture density, lb/ft³
- ρ_v = vapor density, lb/ft³
- φ = liquid dropout time, s

2. Calculate the vapor volumetric flow rate:

$$Q_v = \frac{W_v}{(3,600)(\rho_v)}, \text{ ft}^3/\text{s} \quad (12)$$

3. Calculate the Vessel (inside) diameter:

$$D_{VD} = \left(\frac{4 Q_v}{\pi U_v} \right)^{1/2}, \text{ ft} \quad (13)$$

Table 2. Liquid holdup and surge times.

Services	Holdup Times (NLL-HLL) min.	Surge Time (NLL-LLL) min.	
A. Unit Feed Drum	10	5	
B. Separators			
1. Feed to column	5	3	
2. Feed to other drum or tankage			
a) with pump or through exchanger	5	2	
b) without pump	2	1	
3. Feed to fired heater	10	3	
C. Reflux or product accumulator			
1. Reflux only	3	2	
2. Reflux and product	3+	2+	
* based on reflux (3 min.) + appropriate holdup time of overhead product (per B-1, 2,3)			
D. Column bottoms			
1. Feed to another column	5	2	
2. Feed to other drum or tankage			
a) with pump or through exchanger	5	2	
b) without pump	2	1	
3. Feed to fired boiler	5-8	2-4	
* based on reboiler vapor expressed as liquid (3 min.) + appropriate holdup time for the bottom product (per D-1, 2)			
E. Compressor suction/interstage scrubber			
* 3 min between HLL (HLA) and HLLSD			
* 10 min from bottom tangent line to HLA			
F. Fuel gas knockout drum			
* 20 ft slug in the incoming fuel gas line between NLL and HLLSD			
G. Flare knockout drum			
* 20 to 30 min. to HLL			
Personnel	Factor	Instrumentation	Factor
Experienced	1.0	Well instrumented	1.0
Trained	1.2	Standard instrumented	1.2
Inexperienced	1.5	Poorly instrumented	1.5

If there is a mist eliminator, add 3 to 6 in. to D_{VD} to accommodate a support ring and round up to the next 6 in. increment to obtain D . If there is no mist eliminator $D = D_{VD}$.

4. Calculate the liquid volumetric flow rate:

$$Q_L = \frac{W_L}{(60)(\rho_L)}, \text{ft}^3/\text{min} \quad (14)$$

5. Select holdup time from Table 2 and calculate the holdup volume:

$$V_H = (T_H)(Q_L) \text{ft}^3 \quad (15)$$

Table 3. Low liquid level height.

Vessel diameter	Vertical LLL		Horizontal LLL
	< 300 psia	> 300 psia	
≤ 4 ft	15 in.	6 in.	9 in.
6 ft	15 in.	6 in.	10 in.
8 ft	15 in.	6 in.	11 in.
10 ft	6 in.	6 in.	12 in.
12 ft	6 in.	6 in.	13 in.
16 ft	6 in.	6 in.	15 in.

Table 4. Inlet nozzle sizing.

$$d_N \geq \left(\frac{4Q_m}{\pi 60 \sqrt{\rho_m}} \right)^{1/2}, \text{ft}$$

$$Q_m = Q_L + Q_V, \text{ft}^3/\text{s}$$

$$\rho_m = \rho_L \lambda + \rho_V (1 - \lambda), \text{lb}/\text{ft}^3$$

$$\lambda = \frac{Q_L}{Q_L + Q_V}$$

Table 5. L/D ratio guidelines.

Vessel Operating Pressure (psig)	L/D
0 < P ≤ 250	1.5-3.0
250 < P ≤ 500	3.0-4.0
500 < P	4.0-6.0

6. If the surge volume is not specified, select a surge time from Table 2 and calculate the surge volume:

$$V_s = (T_s)(Q_L) \text{ft}^3 \quad (16)$$

7. Obtain low liquid level height, H_{LLL} , from Table 3.

8. Calculate the height from low liquid level to normal liquid level:

$$H_H = \frac{V_H}{(\pi/4)D^2 V}, \text{ft} \quad (17)$$

1 ft minimum

9. Calculate the height from normal liquid level to high liquid level (or high level alarm):

$$H_S = \frac{V_S}{(\pi/4)D^2 V}, \text{ft} \quad (18)$$

6 in minimum

10. Calculate the height from high liquid level to the centerline of the inlet nozzle:

$$H_{LIN} = 12 + d_N, \text{in. (with inlet diverter)}$$

$$H_{LIN} = 12 + \frac{1}{2} d_N, \text{in. (without inlet diverter)} \quad (19)$$

Note: d_N is calculated as per Table 4.

11. Calculate the disengagement height, from the centerline of the inlet nozzle to:

- the vessel top tangent line if there is no mist eliminator or
- the bottom of the demister pad.

$$H_D = 0.5 D_V \text{ or a minimum of}$$

$$H_D = 36 + \frac{1}{2} d_N, \text{in. (without mist eliminator)} \quad (20)$$

$$H_D = 24 + \frac{1}{2} d_N, \text{inches (with mist eliminator)}$$

12. If there is a mist eliminator, take 6 in. for the mist eliminator pad and take 1 ft. from the top of the mist eliminator to the top tangent line of the vessel.

13. Calculate the total height, H_T of the vessel:

$$H_T = H_{LLL} + H_H + H_S + H_{LIN} + \frac{H_D + H_{ME}}{H_T} \text{ft} \quad (21)$$

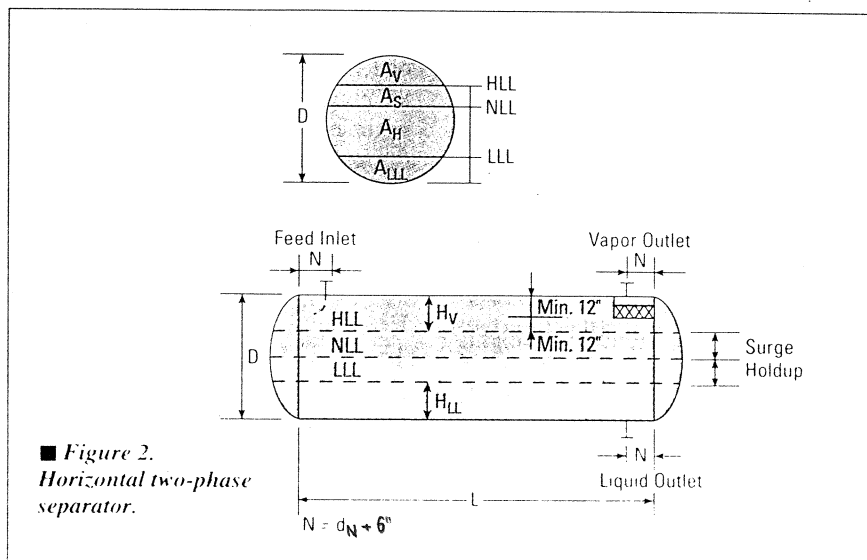
where H_{ME} is the height from step 12; if there is no mist eliminator $H_{ME} = 0$.

Horizontal design procedure (See Figure 2).

1. Calculate the vapor volumetric flow rate, Q_V using Eq. 12.

2. Calculate the liquid volumetric flow rate, Q_L using Eq. 14.

3. Calculate the vertical terminal vapor velocity, U_T using Eq. 13, (K value as per Table 1 for no mist eliminator). Set $U_V = 0.75 U_T$ for a conservative design.



■ Figure 2. Horizontal two-phase separator.

Table 6. Cylindrical height and area conversions.

$$Y = (a + cX + eX^2 + gX^3 + iX^4) / (1.0 + bX + dX^2 + fX + X^2)$$

$$H/D \text{ to } A/A_T \quad fX^3 + hX^4$$

$$Y = A/A_T$$

$$X = H/D$$

$$a = 4.755930E-5$$

$$b = 3.924091$$

$$c = 0.174875$$

$$d = -6.358805$$

$$e = 5.668973$$

$$f = 4.018448$$

$$g = -4.916411$$

$$h = -1.801705$$

$$i = -0.145348$$

$$A/A_T \text{ to } H/D$$

$$Y = H/D$$

$$X = A/A_T$$

$$a = 0.00153756$$

$$b = 26.787101$$

$$c = 3.299201$$

$$d = -22.923932$$

$$e = 24.353518$$

$$f = -14.844824$$

$$g = -36.999376$$

$$h = 10.529572$$

$$i = 9.892851$$

4. Select a holdup time from Table 2 and calculate the holdup volume, V_H , using Eq. 15.

5. If the surge volume is not specified, select the surge time from Table 2 and calculate the surge volume, V_S , using Eq. 16.

6. Obtain an estimate of L/D from Table 5 and initially calculate the diameter according to:

$$D = \left(\frac{4(V_H + V_S)}{(\pi)(0.6)(L/D)} \right)^{1/3}, \text{ ft} \quad (22)$$

(Round to nearest 0.5 ft.)

Calculate the total cross-sectional area

$$A_T = \frac{\pi D^2}{4} \quad (23)$$

Calculate the low liquid level height, H_{LLL} , using Table 3 or

$$H_{LLL} = 0.5D + 7, \text{ in.} \quad (24)$$

where D in ft and round up to the nearest in., if $D \leq 4'0''$, $H_{LLL} = 9$ in.

Table 7. Wall thickness, surface area and approximate vessel height.

	Wall Thickness (in.)	Surface Area (ft ²)
Shell	$\frac{PD}{2SE - 1.2P} + t_c$	πDL
2:1 Elliptical Heads	$\frac{PD}{2SE - 0.2P} + t_c$	$1.09D^2$
Hemispherical Heads	$\frac{PD}{4SE - 0.4P} + t_c$	$1.571D^2$
Dished Heads	$\frac{0.885PD}{SE - 0.1P} + t_c$	$0.842D^2$
Appropriate Vessel Height	$W = \left(\frac{490 \text{ lb}}{ft^3} \right) \left(\frac{t}{12} \right) (A_s + 2A_H)$	

Notes:

P, design pressure, psig (typically, operating pressure + (15-30) psi or 10-15%, whichever greater)

T, design pressure, °F (typically, operating pressure +25-50°F if $T_{op} > 200^\circ\text{F}$, if $T_{op} < 200^\circ\text{F}$, 250°F

- under 650°F does not reduce wall thickness
- if overpressure caused by boiling, should be T_{bp}

D, diameter, in.

S, allowable stress, psi (Reference 9)

E, joint efficiency, (0.6-1.0), 0.85 for spot examined joints, 1.0 for 100% x-ray joints

t_c , corrosion allowance, in, typically 0 to 0.125 in.

t, in., larger of t_c and t_r (to nearest 0.001 in.)

8. Using H_{LLL}/D , obtain A_{LLL}/A_T using Table 6 and calculate the low liquid area, A_{LLL} .

9. If there is no mist eliminator pad, the minimum height of the vapor disengagement area (A_V) is the larger of $0.2D$ or 1 ft. If there is a mist eliminator pad, the minimum height of the vapor disengagement area is the larger of $0.2D$ or 2 ft. Hence, set H_V to the larger of $0.2D$ or 2 ft (1 ft if there is no mist eliminator). Using H_V/D , obtain A_V/A_T using Table 6 and calculate A_V .

10. Calculate the minimum length to accommodate the liquid holdup/surge:

$$L = \frac{V_H + V_S}{A_T - A_V - A_{LLL}}, \text{ ft} \quad (25)$$

11. Calculate the liquid dropout time,

$$\phi = \frac{H_V}{U_V}, \text{ s} \quad (26)$$

12. Calculate the actual vapor velocity, U_{VA} :

$$U_{VA} = \frac{Q_V}{A_V}, \text{ ft/s} \quad (27)$$

13. Calculate the minimum length required for vapor-liquid disengagement, L_{MIN} :

$$L_{MIN} = U_{VA} \phi, \text{ ft} \quad (28)$$

14. If $L < L_{MIN}$, then set $L = L_{MIN}$ (Vapor/Liquid separation is controlling). This simply results in some extra holdup. If $L_{MIN} \gg L$, then increase H_V and repeat from the step 9. If $L > L_{MIN}$, the design is acceptable for vapor/liquid separation. If $L \gg L_{MIN}$, (Liquid holdup is controlling), L can only be decreased and L_{MIN} increased if H_V is decreased. H_V may only be decreased if it is greater than the minimum specified in the step 9.

Table 8. Conditions for the horizontal separator (See Example calculation).

	Mass Flow (lb/h)	ρ (lb/ft ³)
Vapor	$W_v = 145,600$ %	$\rho_v = 4.01$
Liquid	$W_l = 46,100$	$\rho_l = 38.83$

Table 9. Selection of head types.

- 2:1 elliptical heads are typically used when $D < 15$ ft and $P > 100$ psig.
- Hemispherical heads are typically used when $D > 15$ ft regardless of P .
- Dished heads with knuckle radius = $0.6D$ are typically used when $D < 15$ ft and $P < 100$ psig.

Notes:

P = design pressure
 D = drum diameter

(Calculations would have to be repeated from the step 9 with reduced H_v). Calculate L/D . If $L/D > 6.0$ then increase D and repeat calculations from the step 6. If $L/D < 1.5$, then decrease D and repeat calculations from the step 6.

15. Calculate the thickness of the shell and heads according to Table 7.

16. Calculate the surface area of the shell and heads according to Table 7.

17. Calculate the approximate vessel weight according to Table 7.

18. Increase and decrease the diameter by 6 in. increments and repeat the calculations until L/D has ranged from 1.5 to 6.0.

19. With the optimum vessel size (minimum weight), calculate normal and high liquid levels:

$$A_{NLL} = A_{LLL} + V_H/L \quad (29)$$

With A_{NLL}/A_T obtain H_{NLL} from Table 6

$$H_{LLL} = D - H_v \quad (30)$$

Example: Size a horizontal separator with a mist eliminator pad to

$$Q_v = \frac{145,600 \text{ lb/h}}{\left(3,600 \frac{s}{h}\right) \left(4.01 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}\right)} = 10.09 \text{ ft}^3/\text{s}$$

■ Equation A.

$$Q_l = \frac{46,100 \text{ lb/h}}{\left(60 \frac{\text{min}}{h}\right) \left(38.83 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}\right)} = 19.79 \text{ ft}^3/\text{s}$$

■ Equation B.

$$U_T = (0.13) \sqrt{\frac{38.83 - 4.01}{4.01}} = 0.38 \text{ ft/s}$$

■ Equation C.

$$D = \left(\frac{4(197.90 + 98.95)}{\pi(0.6)(5.0)}\right)^{1/3} = 5.01 \text{ ft/s, use 5.0 ft}$$

■ Equation D.

$$L = \frac{V_H + V_S}{A_T - A_v - A_{LLL}}, L = \frac{197.90 + 98.95}{19.63 - 7.34 - 2.16}, 29.3, \text{ say } 29.5 \text{ ft}$$

■ Equation E.

$$\phi = \frac{2.0 \text{ ft}}{0.29 \text{ ft/s}} = 6.90 \text{ s}$$

■ Equation F.

Size a horizontal separator with a mist eliminator pad.

separate the following mixture. The operating pressure is 975 psig and the holdup and surge are to be 10 min and 5 min respectively. Use a design temperature of 650°F. See Table 8.

1. Calculate the vapor volumetric flow rate (Eq. A).

2. Calculate the liquid volumetric flow rate (Eq. B).

3. Calculate the vertical terminal velocity (Eq. C): $K = 0.13$ (GPSA value divided by two since "no mist eliminator" value is used)

$$U_v = 0.75 U_T = 0.29 \text{ ft/s}$$

4. Calculate the holdup volume:

$$V_H = (10 \text{ min.}) (19.79 \text{ ft}^3/\text{min.}) = 197.90 \text{ ft}^3$$

5. Calculate the surge volume:

$$V_S = (5 \text{ min.}) (19.79 \text{ ft}^3/\text{min.}) = 98.95 \text{ ft}^3$$

6. Assume $L/D = 5.0$. Initially set the diameter (Eq. D)

$$A_T = \pi/4 (5.0 \text{ ft})^2 = 19.63 \text{ ft}^2$$

7. Calculate low liquid height:

$$H_{LLL} = (0.5)(5.0) + 7 = 9.5 \text{ in., use } 10 \text{ in.}$$

8. Calculate the low liquid level area:

$$H_{LLL}/D = 0.167$$

Using Table 6, $A_{LLL}/A_T = 0.110$

$$A_{LLL} = (0.110) (19.63 \text{ ft}^2) = 2.16 \text{ ft}^2$$

9. Set $H_v = 2$ ft, $H_v/D = 2/5 = 0.4$

From Table 6, $A_v/A_T = 0.374$

$$A_v = (0.374)(19.63) = 7.34 \text{ ft}^2$$

10. Calculate the length to accommodate holdup/surge (Eq. E).

11. Calculate the liquid dropout time (Eq. F).

12. Calculate the actual vapor velocity (Eq. G).

13. Calculate $L_{MIN} = (1.37 \text{ ft/s})(6.90 \text{ s}) = 9.45 \text{ ft}$

14. $L \gg L_{MIN}$ but H_V is minimum and cannot be reduced so L cannot be reduced.

$$L/D = 29.5/5.0 = 5.9$$

15. Calculate the thickness of the shell and heads according to Table 7:

- Table 9, use 2:1 elliptical heads
- Assume $E = 0.85$
- Assume SA 516 70 Carbon Steel.

Design Temp. = 650°F

- From (9), $S = 17,500 \text{ psi}$
- Assume corrosion allowance = $1/16 \text{ in.}$

• $P = 975 \times 1.1 = 1,072 \text{ psig}$ (See Eq. H).

use $t_s = 2\text{-}3/8 \text{ in.}$ (See Eq. I)

use $t_H = 2\text{-}1/4 \text{ in.}$, and use $t = 2\text{-}3/8 \text{ in.}$

16. Calculate the surface area of the shell and heads according to Table 7:

$A_S = \pi(5.0 \text{ ft})(29.5 \text{ ft}) = 463.38 \text{ ft}^2$ and

$$A_H = (1.09)(5.0 \text{ ft})^2 = 27.25 \text{ ft}^2$$

17. Calculate the approximate vessel weight (Eq. J): = 50,224 lb.

18. Try $D = 5.5 \text{ ft}$ and repeat calculations until minimum weight of shell and heads is obtained. **CEP**

For a free copy of this article, send in the Reader Inquiry card in this issue with the No. 156 circled.

$$U_{VA} = \frac{10.09 \text{ ft}^3/\text{s}}{7.34 \text{ ft}^2} = 1.37 \text{ ft/s}$$

■ Equation G.

$$t_s = \frac{(1,072)(60)}{2(17,500)(0.85) - (1.2)(1,072)} + \frac{1}{16} = 2.322 \text{ in}$$

■ Equation H.

$$t_H = \frac{(1,072)(60)}{2(17,500)(0.85) - (0.2)(1,072)} + \frac{1}{16} = 2.240 \text{ in}$$

■ Equation I.

$$W = \left[\left(490 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right) \left(\frac{2.375 \text{ in}}{12 \text{ in/ft}} \right) (463.38 \text{ ft}^2 + (2)(27.25) \text{ ft}^2) \right]$$

■ Equation J.

Literature Cited

1. **Sauders M., and G.G. Brown**, *Ind. Eng. Chem.*, 26(1), p. 98 (1934).
2. **Gas Processors Suppliers Association**, "Engineering Data Book," 10th edition, Vol. I, Chapter 7 (1987).
3. **Otto H. York Company Inc.**, "Mist Elimination in Gas Treatment Plants and Refineries," Engineering, Parsippany, NJ.
4. **Perry, Robert H. and Cecil H. Chilton**, eds., "Chemical Engineers' Handbook," 5th edition, Chapter 2, p. 2-6 (1973).
5. **Carpentier, P.L.**, "Important Parameters For Cost Effective Separator Design," Shell Oil Company-Head Office

Facilities Engineering, Facilities/Chemical Engineering Conference (1988).

6. **American Petroleum Institute**, Recommended Practice 521 (1982).

7. **Watkins, R.N.**, "Sizing Separators and Accumulators," *Hydrocarbon Processing*, 46(11), p. 253-256 (1967).

8. **Gerunda, Arthur**, "How To Size Liquid Vapor Separators," *Chem. Eng.*, p. 81-84 (1981).

9. **ASME Pressure Vessel Code**, Section VIII, Division 1, Table UCS-23, p. 270-21771 (1986).

W. Y. SVRCEK is a professor in the department of chemical and petroleum engineering at the

University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada (403/220-5751; Fax: 403/282-3945; E-mail: svrcek@acs.ucalgary.ca). Dr. Svrcek previously worked as a senior systems engineer in the control systems group of Monsanto Company, St. Louis, MO. Upon leaving Monsanto, he joined the University of Western Ontario. He received his BSc and PhD degrees in chemical engineering from the University of Alberta, Edmonton.

W. MONNERY is a PhD candidate at the University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada (403/220-5751; Fax: 403/282-3945; E-mail: monnery@acs.ucalgary.ca). He is researching the prediction of physical properties. He previously worked as a process engineer for Colt Engineering Corp. and Lavalin Inc. Mr. Monnery received his BSc and MSc degrees in chemical engineering from the University of Calgary.

Successfully Specify Three-Phase Separators

Here is a stepwise procedure for designing liquid/liquid/vapor separators.

Wayne D. Monnery and William Y. Svrcek,
University of Calgary

It is often necessary to separate two immiscible liquids, the light and heavy phases, and a vapor. A typical example in petroleum refining is the separation of water, and a hydrocarbon liquid and vapor. Little has been published on three-phase (liquid/liquid/vapor) separation, with most information available only in corporate design files. This article attempts to alleviate this situation by covering the basics of three-phase separator design. The authors provide a Step-by-Step procedure and worked out examples. Further, the examples offer guidance on making assumptions for the calculations.

Selecting three-phase separators

As with two-phase designs, three-phase units can be either vertical or horizontal, although they typically are horizontal (see Figures 1 and 2). The vertical orientation, Figure 1, is only used if there is a large amount of vapor to be separated from a small amount of the light and heavy liquid (< 10–20% by weight). Unfortunately, there are no simple rules for separator selection. Sometimes, both configurations should be evaluated to decide which is more economical. Further, the available plot space (footprint) may be a factor.

The design of three-phase separators is similar to their two-phase counterparts, except that the liquid section differs. For the vertical type, a baffle commonly keeps the liquid separation

section calm to promote the separation.

There are different variations of horizontal three-phase vapor-liquid separators. The liquid separation section is usually a variation of a device to provide interface level control, which may include a boot or a weir. A boot typically is specified when the volume of heavy liquid is not substantial (< 15–20% of total liquid by weight), while a weir is used when the volume is substantial. These horizontal separators are illustrated in Figure 2. The bucket-and-weir type design is used when interface level control may be difficult, such as with heavy oils or when large amounts of an emulsion or a paraffin are present (1).

Stokes' law applies

Separating a vapor from a light liquid (two-phase separation) has been covered in a previous article (2) and will not be discussed here. However, all necessary information for performing this part of the calculation is provided here. The following discussion covers the separation of light and heavy liquids.

The flow of rising light droplets in the heavy liquid phase or settling heavy droplets in the light liquid phase is considered laminar and is governed by Stokes' law:

$$U_T = \frac{1,488g_c D_p^2 (\rho_H - \rho_L)}{18\mu} \quad (1)$$

where 1,488 converts viscosity of the

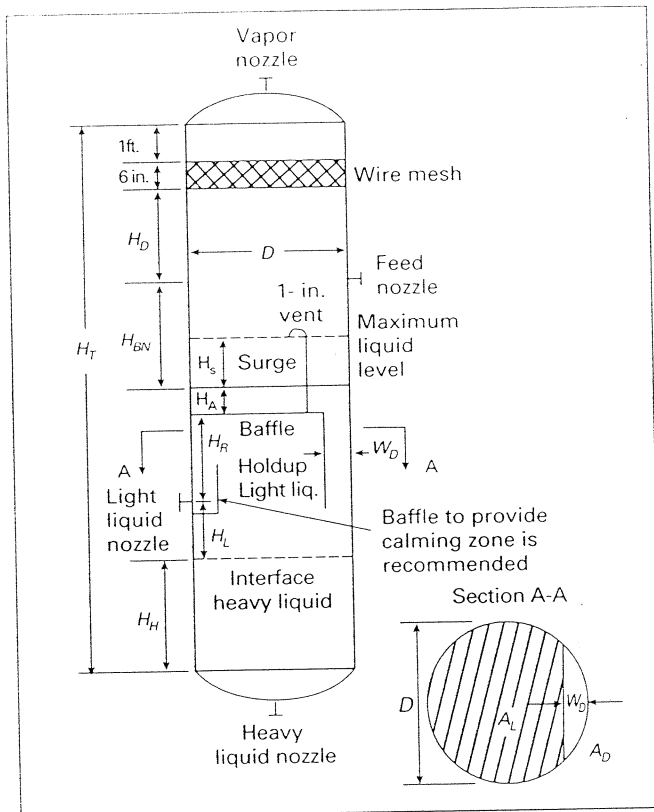


Figure 1. Vertical three-phase separators are used with high vapor loadings.

continuous phase from lb/(ft)(s) to cP.

Simplifying Eq. 1 and converting the units of the terminal settling velocity to in./min from ft/s results in:

$$U_T = \frac{2.06151 \times 10^{-5} D_p^2 (\rho_H - \rho_L)}{\mu} \quad (2)$$

where D_p is in microns (1 micron = 3.28084×10^{-6} feet) and U_T , in./min.

Eq. 2 may be rewritten as:

$$U_T = \frac{k_s (\rho_H - \rho_L)}{\mu} \quad (3)$$

where

$$k_s = 2.06151 \times 10^{-5} D_p^2$$

Values of k_s are given for some systems in Table 1.

From Eqs. 1-3, it can be seen that the settling velocity of a droplet is inversely proportional to the viscosity of the continuous phase. Hence, it

is more difficult (requires more time) to settle the droplets out of the continuous phase with the greater viscosity, since U_T is lower. Practically speaking, U_T is typically limited in calculations to 10 in./min maximum.

For vertical separators, the diameter required for vapor disengagement is calculated as in our previous article (2). In sizing a separator, the heights of the light and heavy liquids are assumed, and the settling velocities and settling times are then calculated.

The residence times of the light and heavy liquids are determined next. For the liquids to separate, the residence time of the light liquid must be greater than the time required for the heavy droplets to settle out of the light liquid phase; and the residence time of the heavy liquid must be greater than the time required for the light liquid droplets to rise out of the heavy liquid phase. If these conditions are not satisfied, then liquid separation is controlling and the vessel diameter must be increased. Holdup time for liquids must be added to residence time. The height of the vertical three-phase separator is calculated in the same manner as for the two-phase case.

For horizontal separators with a given diameter, the heights of the light and heavy liquids are assumed so that the cross-sectional area can be calculated. With the vapor disengagement area set by guidelines, the lengths required by holdup requirements and vapor/liquid separation are calculated. Then, with the assumed heights of the light and heavy liquids and calculated values of settling velocities, the settling times are calculated.

The actual residence times for the light and heavy liquids are subsequently calculated and compared with the required settling times, as in the vertical case. If the residence times are not greater than the required settling times, then either the diameter should be increased or, for a given diameter, the length should be increased (liquid separation is controlling). In the subsequent design procedures, the latter approach is used, along with the procedures discussed in our previous paper for vapor/liquid separation (2).

The following design procedures and heuristics are a result of a review of literature sources and accepted industrial design guidelines. Horizontal design procedures are presented for the four separator types shown in Figure 2. The horizontal design procedures incorporate optimizing the diameter and length by minimizing the approximate weight of the shell and heads. To add a degree of conservatism to the design, the volume available in the heads is ignored.

Table 1. Typical values of k_s for liquid-liquid separations.

Light Phase	Heavy Phase	Minimum droplet dia., μm	k_s
Hydrocarbons			
S_G at 60°F < 0.85	Water or caustic	127	0.333
S_G at 60°F > 0.85	Water or caustic	89	0.163
Water	Furfural	89	0.163
Methylethyl ketone	Water	89	0.163
sec-Butyl alcohol	Water	89	0.163
Methyl isobutyl ketone	Water	89	0.163
Nonyl alcohol	Water	89	0.163

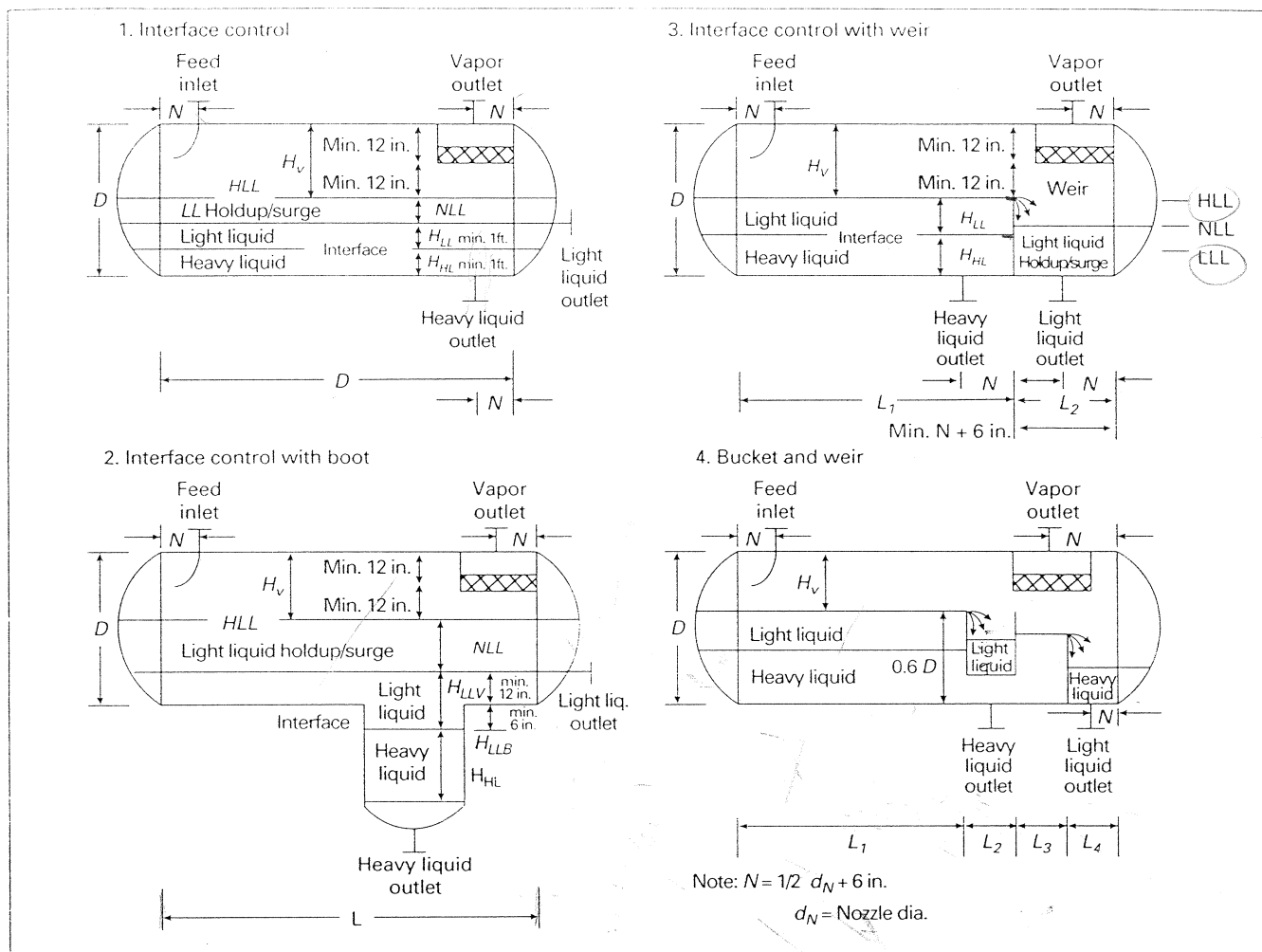


Figure 2. Basic designs of horizontal three-phase separators.

Vertical design procedure

Refer to Figure 1 for dimensions:

1. Calculate the vertical terminal vapor velocity:

$$U_T = K \left(\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V} \right)^{1/2} \quad (4)$$

Calculate the K value, using one of the methods in Table 2 and set $U_V = 0.75U_T$ for a conservative design.

2. Calculate the vapor volumetric flow rate:

$$Q_V = \frac{W_V}{3,600\rho_V} \quad (5)$$

3. Calculate the vessel internal diameter, D_{VD} :

$$D_{VD} = \left(\frac{4Q_V}{\pi U_V} \right)^{1/2} \quad (6)$$

If there is a mist eliminator, add 3–6 in. to D_{VD} to accommodate a support ring and round up to the next 6-in. increment to obtain D ; if there is no mist eliminator, $D = D_{VD}$.

4. Calculate the setting velocity of the heavy liquid out of the light liquid using Stokes' law (the maximum is 10 in./min):

$$U_{HL} = \frac{k_S(\rho_H - \rho_L)}{\mu_L} \quad (7)$$

where k_S is obtained from Table 1 or is calculated (see Eq. 3).

5. Similarly, calculate the rising velocity of the light liquid out of the heavy liquid phase using Stokes' law:

$$U_{LH} = \frac{k_S(\rho_H - \rho_L)}{\mu_H} \quad (8)$$

6. Calculate the light and heavy liquid volumetric flow rates, Q_{LL} and Q_{HL} :

$$Q_{LL} = \frac{W_{LL}}{60\rho_L} \quad (9)$$

$$Q_{HL} = \frac{W_{HL}}{60\rho_H} \quad (10)$$

7. Assume $H_L = 1$ ft (minimum) and calculate the settling time for the

Table 2. Separator K values.

York Demister	
$1 \leq P \leq 15$	$K = 0.1821 + 0.0029P + 0.0460 \ln(P)$
$15 \leq P \leq 40$	$K = 0.35$
$40 \leq P \leq 5,500$	$K = 0.430 - 0.023 \ln(P)$

where P is in psia.

Gas Processors Suppliers' Association	
$0 \leq P \leq 1,500$	$K = 0.35 - 0.0001(P - 100)$

For most vapors under vacuum, $K = 0.20$
 For glycol and amine solutions, multiply K by 0.6–0.8
 For vertical vessels without demisters, divide K by 2
 For compressor suction scrubbers, mole sieve scrubbers and expander inlet separators, multiply K by 0.7–0.8 where P is in psig.

Theoretical (no mist eliminator)

$$K = \sqrt{\frac{4g_c D_p}{3C_D}}$$

where D_p is in ft.
 $C_D = \exp(\gamma)$

$$\gamma = 8.411 - 2.243x + 0.273x^2 - 1.865 \times 10^{-2}x^3 + 5.201 \times 10^{-4}x^4$$

$$x = \ln\left(\frac{0.95 \times 10^8 \rho_v D_p^3 (\rho_L - \rho_v)}{\mu_v^2}\right)$$

where D_p is in ft.
 Note: 1 micron = 3.28084×10^{-6} ft

heavy liquid droplets to settle through this distance (12 is a conversion factor for ft to in.):

$$t_{HL} = \frac{12H_L}{U_{HL}} \quad (11)$$

8. Assume $H_H = 1$ ft (minimum) and calculate the settling time for the light liquid droplets to rise through this distance:

$$t_{LH} = \frac{12H_H}{U_{LH}} \quad (12)$$

9. If there is a baffle plate, calculate the area:

- Calculate $(\rho_L - \rho_v)$.
- Assume H_R (use 9 in. as a minimum) and calculate $H_L + H_R$.
- Use Figure 3 to obtain G .
- Calculate A_D :
See Eq. (13) in the box.
- Assume $W_D = 4$ in.
- Calculate W_D/D .

- Use Table 3 to determine A_D/A .
- Calculate $A = (\pi/4)D^2$.
- Calculate A_D .
- Select the larger value of A_D .
- Calculate the area of the baffle plate = settling area for the light liquid: $A_L = A - A_D$.
- Calculate the residence time of each phase based on the volumes occupied by the light and heavy phases:

$$\theta_{LL} = \frac{H_L A_L}{Q_{LL}} \quad (14a)$$

$$\theta_{HL} = \frac{H_H A_H}{Q_{HL}} \quad (14b)$$

If $\theta_{LL} < t_{HL}$ or $\theta_{HL} < t_{LH}$, increase the diameter and repeat the procedure from Step 7 (liquid separation is controlling). Note that $A_H = A$.

11. Calculate the height of the light liquid above the outlet (holdup

height) based on the required holdup time:

$$H_R = \frac{Q_{LL} T_H}{A_L} \quad (15)$$

Check this value with that assumed in Step 9b to ensure that the assumed value is reasonable. If surge is not specified, calculate the surge height based on surge time:

$$H_S = \frac{(Q_{LL} + Q_{HL}) T_S}{A} \quad (16)$$

The minimum is 6 in.

12. Calculate the vessel height using the guidelines:

- $H_A = 6$ in. minimum.
- $H_{BN} = \frac{1}{2} d_N + \text{greater of } (2 \text{ ft or } H_S + 0.5 \text{ ft}).$
- $H_D = 0.5D$ or a minimum of:
 - 36 in. + $\frac{1}{2} d_N$ (without mist eliminator), or
 - 24 in. + $\frac{1}{2} d_N$ (with mist eliminator):

$$A_D = \left(\frac{7.48 \text{ gal}}{\text{ft}^3}\right) \left(\frac{60 \text{ min}}{\text{h}}\right) \left(\frac{(Q_{LL} + Q_{HL})}{G}\right)$$

Equation 13

$$U_T = 0.313 \sqrt{\frac{53.95 - 0.6973}{0.6973}} = 2.74 \text{ ft/s}$$

Equation E1

$$Q_v = \frac{415,000 \text{ lb/h}}{3,600 \text{ s/h} \times 0.6973 \text{ lb/ft}^3} = 165.32 \text{ ft}^3/\text{s}$$

Equation E2

$$D_{VD} = \sqrt{\frac{4 \times 165.32 \text{ ft}^3/\text{s}}{\pi \times 2.05 \text{ ft/s}}} = 10.13 \text{ ft}$$

Equation E3

$$Q_{LL} = \frac{16,5000 \text{ lb/h}}{60 \text{ min/h} \times 53.95 \text{ lb/ft}^3} = 5.10 \text{ ft}^3/\text{min}$$

Equation E4

$$Q_{HL} = \frac{1,300 \text{ lb/h}}{60 \text{ min/h} \times 62.11 \text{ lb/ft}^3} = 0.35 \text{ ft}^3/\text{min}$$

Equation E5

Table 3. Cylindrical height and area conversions.

$$y = \frac{a + cx + ex^2 + gx^3 + ix^4}{1.0 + bx + dx^2 + fx^3 + hx^4}$$

H/D to A/A_T*

$$y = A/A_T$$

$$x = H/D$$

$$a = -4.755930 \times 10^{-5}$$

$$b = 3.924091$$

$$c = 0.174875$$

$$d = -6.358805$$

$$e = 5.668973$$

$$f = 4.018448$$

$$g = -4.916411$$

$$h = -1.801705$$

$$i = -0.145348$$

A/A_T to H/D*

$$y = H/D$$

$$x = A/A_T$$

$$a = 0.00153756$$

$$b = 26.787101$$

$$c = 3.299201$$

$$d = -22.923932$$

$$e = 24.353518$$

$$f = -14.844824$$

$$g = -36.999376$$

$$h = 10.529572$$

$$i = 9.892851$$

* = Or equivalent expressions, such as H_T/D to A_T/A_T.

$$H_T = H_H + H_L + H_R + H_A + H_{BX} + H_M \quad (17)$$

If a mist eliminator pad is used, additional height is added as shown in Figure 1.

Example 1

Size a vertical separator with a baffle plate and wire-mesh mist eliminator to separate the mixture given in Table 4. The operating pressure is 165 psia, and it is necessary to have a hydrocarbon liquid holdup time of 25 min and a surge time of only 5 min.

1. Calculate the vertical terminal velocity. Using Table 2, calculate *K* using the York Demister equations, see Eq. E1 in the box.

$$\text{and } U_v = 0.75 \times 2.74 = 2.05 \text{ ft/s.}$$

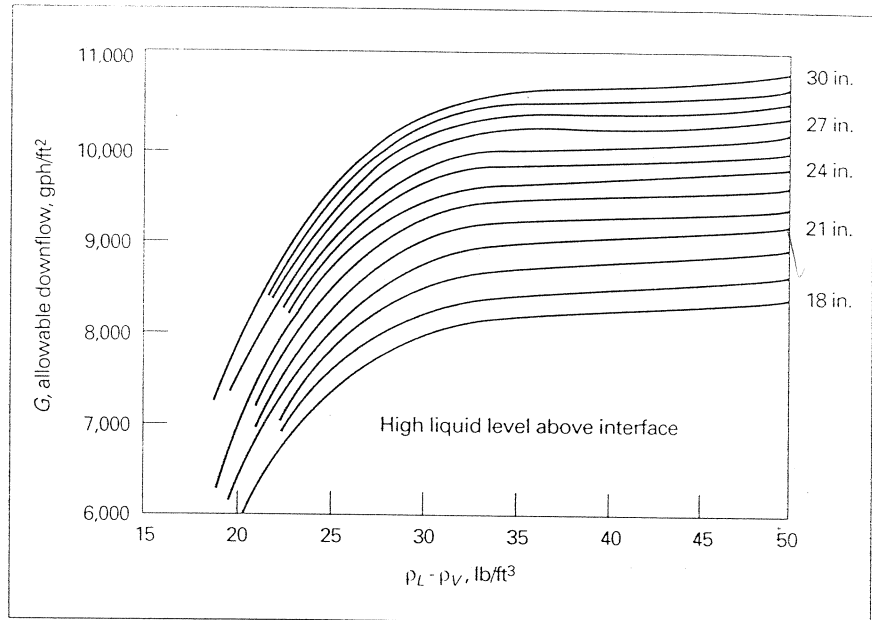


Figure 3. *G* is found from the downcomer allowable flow.

Table 4. Data for Example 1.

	Mass Flow, lb/h	ρ , lb/ft ³	μ , cP
Hydrocarbon Gas	$W_V = 415,000$	$\rho_V = 0.6973$	—
Hydrocarbon Liquid	$W_{LL} = 16,500$	$\rho_L = 53.95$	$\mu_L = 0.630$
Water	$W_H = 1,300$	$\rho_H = 62.11$	$\mu_H = 0.764$

2. Calculate the vapor volumetric flow rate, see Eq. E2 in the box.

3. Calculate the vessel inner diameter, see Eq. E3 in the box.

$$\text{Use } D = 10.5 \text{ ft.}$$

4. Calculate the settling velocity of the heavy liquid out of the light liquid phase. Using Table 1, $k_s = 0.163$. Then:

$$U_{HL} = 0.163(62.11 - 53.95)/0.630 = 2.11 \text{ in./min}$$

5. Calculate the settling velocity of the light liquid out of the heavy liquid phase:

$$U_{LH} = 0.163(62.11 - 53.95)/0.764 = 1.74 \text{ in./min}$$

6. Calculate the light and heavy liquid volumetric flow rates, see Eq. E4 and E5 in the box.

7. Assume $H_L = 1$ ft and calculate the time for the heavy liquid to settle out of the light liquid phase:

$$t_{HL} = (12)(1.0)/2.11 = 5.7 \text{ min}$$

8. Assume $H_H = 1$ ft and calculate

the time for the light liquid to rise out of the heavy liquid phase:

$$t_{LH} = (12)(1.0)/1.74 = 6.9 \text{ min}$$

9. Calculate

the baffle plate area:

$$\rho_L - \rho_V = 53.95 - 0.6973 = 53.25 \text{ lb/ft}^3$$

• Assume $H_R = 12$ in., $H_L + H_R = 24$ in. Using Figure 3, $G = 9,800$ gph/ft².

$$A_D = (7.48 \text{ gal/ft}^3)(60 \text{ min/h})(5.10 + 0.35)(\text{ft}^3)/9,800 \text{ gph/ft}^2 = 0.25 \text{ ft}^2$$

• Assume $W_D = 4$ in.:

$$W_D/D = 4/(12 \times 10.5) = 0.0317$$

Table 5. Inlet nozzle sizing.

$$d_N \geq \left(\frac{4Q_M}{60\pi\sqrt{\rho_M}} \right)^{1/2}$$

$$\rho_M = \rho_L \lambda + \rho_V(1 - \lambda)$$

$$\lambda = \frac{Q_L}{Q_L + Q_V}$$

$$Q_{MIN} = Q_L + Q_V \text{ ft}^3/\text{s}$$

$$\frac{Q_M}{4d_N^2} = U_M \leq \frac{60}{\sqrt{\rho_M}}$$

Table 6. Liquid holdup and surge times.

Service	Holdup time, min (NLL to LLL)	Surge time, min (NLL to HLL)
A. Unit feed drum	10	5
B. Separators		
1. Feed to column	5	3
2. Feed to other drum or tankage		
a. With pump or through exchanger	5	2
b. Without pump	2	1
3. Feed to fired heater	10	3
C. Reflux or product accumulator		
1. Reflux only	3	2
2. Reflux and product (Based on reflux (3 min) plus appropriate holdup time of overhead product (as per B 1-3))	3+	2+
D. Column bottoms		
1. Feed to another column	5	2
2. Feed to other drum or tankage		
a) With pump or through exchanger	5	2
b) Without pump	2	1
3. Feed to fired reboiler (Based on reboiler vapor expressed as liquid (3 min) plus appropriate holdup time for the bottom product (as per D 1, 2))	5-8	2-4
E. Compressor suction/interstage scrubber		
3 min between HLL (high liquid alarm) and high level shutdown		
10 min from bottom tangent line to high liquid alarm		
F. Fuel gas knock-out drum		
20 ft. slug in the incoming fuel gas line between NLL and high level shutdown		
G. Flare Knock-out drum		
20 to 30 min to HLL		

Multiply by the following factors (optional):

Personnel	Factor	Instrumentation	Factor
Experienced	1.0	Well Instrumented	1.0
Trained	1.2	Standard Instrumented	1.2
Inexperienced	1.5	Poorly Instrumented	1.5

$$\rho_L = \frac{16,500}{17,800} \times 53.95 + \frac{1,300}{17,800} \times 62.11 = 54.55 \text{ lb/ft}^3$$

■ Equation E6

$$d_N \geq \left(\frac{4 \times 165.41}{60 \pi \sqrt{0.730}} \right)^{1/2} = 1.73 \text{ ft}$$

■ Equation E7

- Using Table 3, $A_L/A = 0.0095$:
 $A = (\pi/4)(10.5 \text{ ft})^2 = 86.59 \text{ ft}^2$
 $A_D = (0.0095)(86.59 \text{ ft}^2) = 0.82 \text{ ft}^2$
- Use $A_D = 0.82 \text{ ft}^2$.
 $A_L = 86.59 - 0.82 = 85.77 \text{ ft}^2$

10. Calculate the residence time of each phase:

$$\theta_{LL} = (1.0 \text{ ft})(85.77 \text{ ft}^2)/5.10 \text{ ft}^3/\text{min} = 16.8 \text{ min}$$

$$\theta_{HL} = (1.0 \text{ ft})(86.59 \text{ ft}^2)/0.35 \text{ ft}^3/\text{min} = 247.4 \text{ min}$$

11. Calculate the height of the light liquid above the outlet, based on holdup:

$$H_R = (5.10 \text{ ft}^3/\text{min})(25 \text{ min})/85.77 \text{ ft}^2 = 1.5 \text{ ft}$$

$$H_S = (5.10 + 0.35)(\text{ft}^3/\text{min})(5 \text{ min})/86.59 \text{ ft}^2 = 0.31 \text{ ft}$$

Use $H_S = 0.5 \text{ ft}$.

12. Calculate d_N according to Table 5:

$$\lambda = Q_L/(Q_L + Q_V) = (5.10 + 0.35)/(5.10 + 0.35 + 165.32 \times 60) = 0.0006$$

Use Eq. E6 (see box) to calculate

$$\rho_M = \rho_L \lambda + \rho_V (1 - \lambda) = (54.55)(0.0006) + (0.6973)(1 - 0.0006) = 0.730$$

$$Q_M = 165.32 + (5.10 + 0.35)/60 = 165.41 \text{ ft}^3/\text{s}$$

Use Eq. E7 (see box) to calculate d_N .

$$d_N \geq 21 \text{ in.}; \text{ use } d_N = 24 \text{ in.}$$

Calculate H_D :

$$H_D = 0.5(10.5) = 5.25 \text{ ft or}$$

$$H_D = 24 + 24/2 = 36 \text{ in.} = 3.0 \text{ ft (minimum)}$$

Use $H_D = 5.5 \text{ ft}$. From Figure 1, $H_T = 1 \text{ ft}$ and $s = 0.5 \text{ ft}$. Calculate H_{BN} :

$$H_{BN} = 1/2(2.0 \text{ ft}) + 2 \text{ ft} = 3 \text{ ft}$$

Set $H_A = 0.5 \text{ ft}$. Final dimensions: $D = 10.5 \text{ ft}$, $H_H = 1.0 \text{ ft}$, $H_L = 1.0 \text{ ft}$, $H_R = 1.5 \text{ ft}$, $H_A = 0.5 \text{ ft}$, $H_{BN} = 3.0 \text{ ft}$, and $H_D = 5.5 \text{ ft}$. Add 1.5 ft for the mist eliminator.

$$H_T = 14.0 \text{ ft}$$

$$H_T/D = 14.0/10.5 = 1.3$$

Add 2 ft to H_T ($H_R = 2.0 \text{ ft}$, $H_D = 7.0 \text{ ft}$) so that $H_T/D = 1.52$ (H_T/D should be in the range of 1.5 to 6.0).

Horizontal design procedure: no boot or weir

1. Calculate the vapor volumetric flow rate, Q_V , using Eq. 5.

2. Calculate the light and heavy liquid volumetric flow rates, Q_{LL} and Q_{HL} , using Eqs. 9 and 10.

3. Calculate the vertical terminal velocity, U_T , using Eq. 4. (select a K value from Table 2) and set $U_V = 0.75U_T$.

4. Select holdup and surge times from Table 6 and calculate the holdup and surge volumes, V_H and V_S , (unless surge is otherwise specified, such as a slug volume):

$$V_H = T_H Q_L \quad (18)$$

$$V_S = T_S Q_L \quad (19)$$

5. Obtain an L/D from Table 7 and initially calculate the diameter according to:

$$D = \left(\frac{4(V_H + V_S)}{0.5\pi(L/D)} \right)^{1/3} \quad (20)$$

Calculate the total cross-sectional area:

$$A_T = \frac{\pi D^2}{4} \quad (21)$$

6. Set the vapor space height, H_V , to the larger of $0.2D$ or 2 ft; 1 ft if there is no mist eliminator. Using H_V/D in Table 3, obtain A_V/A_T and calculate A_V .

7. Set the heights of the heavy and light liquids, H_{HL} and H_{LL} .

8. Find $(A_{HL} + A_{LL})/A_T$, using $(H_{HL} + H_{LL})/D$ in Table 3, and calculate $A_{HL} + A_{LL}$.

9. Calculate the minimum length to accommodate the liquid holdup/surge:

$$L = \frac{V_H + V_S}{A_T - A_V - (A_{HL} + A_{LL})} \quad (22)$$

10. Calculate the liquid dropout time:

$$\phi = H_V/U_V \quad (23)$$

11. Calculate the actual vapor

Table 7. L/D ratio guidelines.

Vessel operating pressure, psig	L/D
$0 < P \leq 250$	1.5-3.0
$250 < P < 500$	3.0-4.0
$500 < P$	4.0-6.0

velocity:

$$U_{VA} = Q_V/A_V \quad (24)$$

12. Calculate the minimum length required for vapor/liquid separation:

$$L_{MIN} = U_{VA} \phi \quad (25)$$

13. If $L < L_{MIN}$, then set $L = L_{MIN}$ (here, vapor/liquid separation controls). This simply results in some extra holdup and residence time. If $L \ll L_{MIN}$, then increase H_V and recalculate A_V , and repeat, starting from Step 9. If $L > L_{MIN}$, the design is acceptable for vapor/liquid separation. If $L \gg L_{MIN}$ (liquid holdup controls), L can only be reduced and L_{MIN} increased if H_V is reduced. H_V may only be reduced if it is greater than the minimum specified in Step 6. (With reduced H_V , recalculate A_V and repeat the procedure from Step 9.) **Note:** For this and other calculations, "much greater than" (\gg) and "much less than" (\ll) mean a variance of greater than 20%.

14. Calculate the settling velocities of the heavy liquid out of the light liquid phase and the light liquid out of the heavy liquid phase, U_{HL} and U_{LH} , using Eqs. 7 and 8 (find k_S from Table 1).

15. Calculate the settling times of the heavy liquid out of the light phase and the light liquid out of the heavy phase:

$$t_{HL} = 12(D - H_V - H_{HL})/U_{HL} \quad (26)$$

$$t_{LH} = 12H_{HL}/U_{LH} \quad (27)$$

16. Calculate the residence times of the light and heavy liquids:

$$\theta_{HL} = A_{HL}L/Q_{HL} \quad (28)$$

$$\theta_{LL} = \frac{(A_T - A_V - A_{HL})L}{Q_{LL}} \quad (29)$$

17. If $\theta_{HL} < t_{LH}$ or $\theta_{LL} < t_{HL}$, then increase the vessel length (liquid separation controls):

$$L = \max \left(\frac{t_{LH}Q_{HL}}{A_{HL}}, \frac{t_{HL}Q_{LL}}{(A_T - A_V - A_{HL})} \right) \quad (30)$$

18. Calculate L/D . If $L/D \ll 1.5$, decrease D (unless it is already at its minimum), and if $L/D \gg 6.0$ then increase D ; repeat from Step 5.

19. Calculate the thickness of the shell and heads according to Table 8.

20. Calculate surface area of the shell and heads according to Table 8.

21. Calculate the approximate vessel weight according to Table 8.

22. Increase or decrease the vessel diameter by 6-in. increments and repeat the calculations until the L/D ratio ranges from 1.5-6.0.

23. Using the optimum vessel size (minimum weight), calculate the normal and high liquid levels:

$$H_{NLL} = D - H_V \quad (31)$$

$$A_{NLL} = (A_{HL} + A_{LL}) + V_H/L \quad (32)$$

Obtain H_{NLL} using Table 3 with the value of A_{NLL}/A_T .

Horizontal design procedure: heavy liquid boot

1. Calculate the vapor volumetric flow rate, Q_V , using Eq. 5.

2. Calculate the light and heavy liquid volumetric flow rates, Q_{LL} and Q_{HL} , per Eqs. 9 and 10.

3. Calculate the vertical terminal velocity, U_T , using Eq. 4 (the K value comes from Table 2) and set $U_V = 0.75U_T$.

4. Select holdup and surge times from Table 6 and calculate the holdup and surge volumes, V_H and V_S , from Eqs. 18 and 19 (unless surge is other-

wise specified, such as slug volume).

5. Obtain L/D from Table 7 and initially set the diameter according to:

$$D = \left(\frac{4(V_H + V_S)}{0.6\pi(L/D)} \right)^{1/3} \quad (33)$$

Then calculate the total cross-sectional area, A_T , using Eq. 21.

6. Set the vapor space height, H_V , to the larger of $0.2D$ or 2 ft (1 ft if there is no mist eliminator). Using H_V/D in Table 3, obtain A_V/A_T and calculate A_V .

7. Set the light liquid heights in the vessel and boot, H_{LLV} and H_{LLB} .

8. Calculate the cross-sectional area of the light liquid above the bottom of the vessel, A_{LLV} , using H_{LLV}/D in Table 3.

9. Calculate the minimum length to accommodate the liquid holdup/surge:

$$L = \frac{V_H + V_S}{A_T - A_V - A_{LLV}} \quad (34)$$

10. Calculate the liquid dropout time, ϕ , using Eq. 23.

11. Calculate the actual vapor velocity, U_{VA} , using Eq. 24.

12. Calculate the minimum length required for liquid/vapor separation, L_{MIN} , using Eq. 25.

13. If $L < L_{MIN}$, then set $L = L_{MIN}$ (vapor/liquid separation controls). This simply results in some extra holdup and residence time. If $L \ll L_{MIN}$, then increase H_V and recalculate A_V , then repeat from Step 9. If $L > L_{MIN}$, the design is acceptable for vapor/liquid separation. If $L \gg L_{MIN}$, liquid holdup controls. L can only be reduced and L_{MIN} increased if H_V is reduced. H_V may only be reduced if it is greater than the minimum specified in Step 6.

With reduced H_V , recalculate A_V and repeat from Step 9.

14. Calculate the settling velocity of the heavy liquid out of the light liquid phase, U_{HL} , using Eq. 7 (obtain k_s from Table 1).

15. Calculate the settling time of

Table 8. Wall thickness, surface area, and approximate vessel weight.

Component	Wall Thickness, t	Surface Area, A
Shell	$\frac{PD}{2SE - 1.2P} + t_c$	πDL
2:1 Elliptical Heads	$\frac{PD}{2SE - 0.2P} + t_c$	$1.09 D^2$
Hemispherical Heads	$\frac{PD}{4SE - 0.4P} + t_c$	$1.571 D^2$
Dished Heads	$\frac{0.885PD}{SE - 0.1P} + t_c$	$0.842 D^2$

Approximate Vessel Weight

$$W = \left(\frac{490 \text{ lb}}{\text{ft}^3} \right) \left(\frac{t}{12} \right) (A_{shell} + 2A_{head})$$

Notes: The design pressure, P , is typically either the operating pressure with 15 to 30 psi added to it or the operating pressure + 10%, whichever is greater. For the allowable stress, S , see Reference (3). The joint efficiency, E , ranges from 0.6 to 1; use 0.85 for spot-examined joints, and 1 for 100% X-rayed joints. The corrosion allowance, t_c , typically ranges from $1/16$ to $1/8$ in. The vessel thickness, t , is the larger of t_s and t_r up to the nearest $1/8$ in.

the heavy liquid out of the light liquid phase:

$$t_{HL} = 12 (H_{LLB} + D - H_V) / U_{HL} \quad (35)$$

16. Calculate the residence time of the light liquid:

$$\theta_{LL} = \frac{(A_T - A_V)L}{Q_{LL}} \quad (36)$$

Note: This volume of light liquid ignores the light liquid volume in the boot.

17. If $\theta_{LL} < t_{HL}$, then increase the vessel length (liquid separation controls):

$$L = \frac{t_{HL} Q_{LL}}{(A_T - A_V)} \quad (37)$$

18. Calculate L/D . If $L/D \ll 1.5$ then decrease D (unless it is already at a minimum) and if $L/D \gg 6.0$ then increase D ; repeat from Step 5.

19. Calculate the thickness of the shell and heads according to Table 8.

20. Calculate the surface area of the shell and heads according to Table 8.

21. Calculate the approximate weight of the shell and heads according to Table 8.

22. Increase or decrease the vessel diameter by 6-in. increments and repeat the calculations until L/D ranges from 1.5–6.0.

23. With the optimum vessel size (minimum weight), calculate the normal and high liquid levels:

$$H_{HLL} = D - H_V \quad (38)$$

$$A_{NLL} = A_{LLV} + V_H/L \quad (39)$$

Determine H_{NLL} using Table 3 from A_{NLL}/A_T .

24. Design the heavy liquid boot: Set the height of the heavy liquid, H_{HL} ; calculate the rising velocity of the light liquid out of the heavy liquid phase, U_{LH} , using Eq. 8 (find k_s from

Table 1); set $U_p = 0.75 U_{LH}$; calculate the heavy liquid boot diameter:

$$D_B = \sqrt{\frac{4 \times 12 Q_{HL}}{\pi U_p}} \quad (40)$$

Then calculate the settling time of the light liquid out of the heavy liquid phase:

$$t_{LH} = 12 H_{HL} / U_{LH} \quad (41)$$

Calculate the residence time of the heavy liquid:

$$\theta_{HL} = \frac{\pi D_p^2 H_{HL}}{4 Q_{HL}} \quad (42)$$

If $\theta_{HL} < t_{LH}$, then increase the boot diameter.

Horizontal design procedure: weir

1. Calculate the vapor volumetric flow rate, Q_V , using Eq. 5.

2. Calculate the light and heavy liquid volumetric flow rates, Q_{LL} and Q_{HL} , as per Eqs. 9 and 10.

3. Calculate the vertical terminal vapor velocity, U_T , using Eq. 4 (find K from Table 2) and set $U_V = 0.75 U_T$.

4. Select holdup and surge times from Table 6, and calculate the holdup and surge volumes, V_H and V_S , from Eqs. 18 and 19 (unless surge is otherwise specified, such as a slug volume).

5. Obtain L/D from Table 7 and initially calculate the diameter according to:

$$D = \left(\frac{16(V_H + V_S)}{0.6\pi(L/D)} \right)^{1/3} \quad (43)$$

Then calculate the total cross-sectional area, A_T , using Eq. 21.

6. Set the vapor space height, H_V , to the larger of $0.2D$ or 2 ft (1 ft if there is no mist eliminator). Using H_V/D in Table 3, obtain A_V/A_T and calculate A_V .

7. Calculate the low liquid level in

Vessel dia., ft	Vertical III, in.		Horizontal III, in.
	< 300 psia	> 300 psia	
< 4	15	6	9
6	15	6	10
8	15	6	11
10	6	6	12
12	6	6	13
16	6	6	15

the light liquid compartment using Eq. 44 or read it from Table 9.

$$H_{LLL} = 0.5D + 7 \quad (44)$$

where D is in feet and H_{LLL} in inches (round up to nearest in.). If $D \leq 4.0$ ft, then $H_{LLL} = 9$ in. Using H_{LLL}/D in Table 3, Calculate A_{LLL} .

8. Calculate the weir height:

$$H_W = D - H_V \quad (45)$$

If $H_W < 2$ ft, increase D , and repeat the calculations from Step 6.

9. Calculate the minimum length of the light liquid compartment to accommodate holdup/surge, L_2 , in Figure 2:

$$L_2 = \frac{V_H + V_S}{A_T - A_V - A_{LLL}} \quad (46)$$

Round to the nearest 1/2 ft. The minimum for $L_2 = d_N + 12$ in.

10. Set the interface at the height $H_W/2$, obtaining the heights of the heavy and light liquids, H_{HL} and H_{LL} .

11. For the liquid settling compartment, calculate the cross-sectional area of the heavy liquid, using H_{HL}/D in Table 3 and calculate the cross-sectional area of the light liquid from:

$$A_{LL} = A_T - A_V - A_{HL} \quad (47)$$

12. Calculate the settling velocity of the heavy liquid out of the light liquid phase, U_{HL} , and the light liquid out of the heavy liquid phase, U_{LH} , using Eqs 7 and 8 (find k_s from Table 1).

13. Calculate the settling times of the heavy liquid out of the light liquid phase and the light liquid out of the heavy liquid phase:

$$t_{HL} = 12 H_{LL} / U_{HL} \quad (48)$$

$$t_{LH} = 12 H_{HL} / U_{LH} \quad (49)$$

14. Calculate minimum L_1 to facilitate liquid-liquid separation as the larger of:

$$L_1 = \max \left(\frac{t_{LH} Q_{HL}}{A_{HL}}, \frac{t_{HL} Q_{LL}}{A_{LL}} \right) \quad (50)$$

Round to the nearest 1/2 ft.

15. Find L :

$$L = L_1 + L_2 \quad (51)$$

16. Calculate the liquid dropout time, ϕ , using Eq. 23.

17. Calculate the actual vapor velocity, U_{VA} , using Eq. 24.

18. Calculate the minimum length required for vapor/liquid separation, L_{MIN} , using Eq. 25.

19. If $L < L_{MIN}$, then set $L = L_{MIN}$ (vapor/liquid separation controls). This simply results in some extra holdup and residence time. If $L \ll L_{MIN}$, then increase H_V , recalculate A_V and repeat the calculations from Step 6. If $L > L_{MIN}$, the design is acceptable for vapor/liquid separation. If $L \gg L_{MIN}$ (liquid separation and holdup control), L can only be reduced and L_{MIN} increased if H_V is reduced. H_V may only be reduced if it is greater than the minimum specified in Step 9. With reduced H_V , recalculate A_V and repeat from Step 9.

20. Calculate L/D . If $L/D \ll 1.5$, then decrease D (unless it is already at a minimum) and repeat from Step 6. If $L/D \gg 6.0$, then increase D and repeat from Step 5.

21. Calculate the thickness of the shell and heads according to Table 8.

22. Calculate the surface area of the shell and heads according to Table 8.

23. Calculate the approximate vessel weight according to Table 8.

24. Increase or decrease the diameter by 6-in. increments and repeat the calculations until L/D ranges from 1.5–6.0.

25. With the optimum vessel size (minimum weight), calculate normal and high liquid levels:

$$H_{III} = D - H_V \quad (52)$$

$$A_{NLL} = A_{LLL} + V_H/L_2 \quad (53)$$

Obtain H_{NLL} using Table 3 with A_{NLL}/A_T .

Horizontal design procedure: bucket and weir

1. Calculate the vapor volumetric flow rate, Q_V , using Eq. 5.

2. Calculate the light and heavy liquid volumetric flow rates, Q_{LL} and Q_{HL} , per Eqs. 9 and 10.

3. Calculate the vertical terminal vapor velocity, U_T , using Eq. 4 (find K from Table 2) and set $U_V = 0.75 U_T$.

4. Select residence times for light and heavy liquids, θ_{LL} and θ_{HL} . For sour water stripper feed drums, $\theta_{HL} =$

Literature Cited

1. Arnold, K., and M. Stewart, "Surface Production Operations," Chapter 5, Gulf Publishing Co., Houston, pp. 123-149 (1986).
2. Syreck, W. V., and W. D. Monnery, "Design Two-Phase Separators Within the Right Limits," *Chem. Eng. Progress*, 89(10), pp. 53-60 (Oct. 1993).
3. American Society of Mechanical Engineers, "ASME Pressure Vessel Code," Sec. VIII, Div. 1, Table UCS-23, ASME, New York, pp. 270-271 (1986).

60 min for refinery service, or 10–15 min for chemical-plant service. For amine regenerator feed drums, $\theta_{HL} = 10$ –15 min.

5. Obtain L/D from Table 7 and initially set the diameter according to:

$$D = \left(\frac{4(Q_{LL}\theta_{LL} + Q_{HL}\theta_{HL})}{0.70\pi(L/D)} \right)^{1/3} \quad (54)$$

Then calculate the total cross-sectional area, A_T , using Eq. 21.

6. Set the vapor space height, H_V , to the larger of $0.2D$ or 2 ft (1 ft if

there is no mist eliminator). Using H_V/D in Table 3, obtain A_V/A_T and calculate A_V .

7. Calculate L_1 :

$$L_1 = \frac{(Q_{LL}\theta_{LL} + Q_{HL}\theta_{HL})}{A_T - A_V} \quad (55)$$

8. Calculate the liquid dropout time, ϕ , using Eq. 23.

9. Calculate the actual vapor velocity, U_{VA} , using Eq. 24.

10. Calculate the minimum length required for vapor/liquid separation, L_{MIN} , using Eq. 25.

11. If $L_1 < L_{MIN}$, then set $L_1 = L_{MIN}$ (vapor/liquid separation controls). This simply results in some extra holdup and residence time. If $L_1 \ll L_{MIN}$, then increase H_V , recalculate A_V and repeat the calculations from Step 7. If $L_1 > L_{MIN}$, the design is acceptable for vapor/liquid separation.

12. Calculate the light liquid layer thickness based on the heavy liquid settling out:

$$Q_V = \frac{235,000 \text{ lb/h}}{3,600 \text{ s/h} \times 0.190 \text{ lb/ft}^3} = 343.57 \text{ ft}^3/\text{s}$$

■ Equation E8

$$Q_{LL} = \frac{45,000 \text{ lb/h}}{60 \text{ min/h} \times 40.5 \text{ lb/ft}^3} = 18.52 \text{ ft}^3/\text{min}$$

■ Equation E9

$$Q_{HL} = \frac{7,500 \text{ lb/h}}{60 \text{ min/h} \times 62.0 \text{ lb/ft}^3} = 2.02 \text{ ft}^3/\text{min}$$

■ Equation E10

$$U_T = 0.175 \sqrt{\frac{40.5 - 0.19}{0.19}} = 2.55 \text{ ft/s}$$

■ Equation E11

$$D = \left(\frac{4 \times 277.80}{0.6\pi \times 1.7 \times 1/4} \right)^{1/3} = 11.15 \text{ ft, use 11.0 ft}$$

■ Equation E12

$$L_2 = \frac{277.80}{95.03 - 71.08 - 4.85} = 14.54 \text{ ft}$$

■ Equation E13

$$\frac{t_{LH}Q_{HL}}{A_{HL}} = \frac{2.0 \text{ min} \times 2.02 \text{ ft}^3/\text{min}}{8.93 \text{ ft}^2} = 0.45 \text{ ft}$$

■ Equation E14

$$\frac{t_{HL}Q_{LL}}{A_{LL}} = \frac{2.0 \text{ min} \times 18.52 \text{ ft}^3/\text{min}}{15.02 \text{ ft}^2} = 2.47 \text{ ft}$$

■ Equation E15

$$U_{VA} = \frac{Q_V}{A_V} = \frac{343.57 \text{ ft}^3/\text{s}}{71.08 \text{ ft}^2} = 4.83 \text{ ft/s}$$

■ Equation E16

W. D. MONNERY is a PhD candidate at the University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada (403/220-5542; Fax: 403/282-3945). He is researching the prediction of physical properties. Previously, he worked as a process engineer for Colt Engineering Corp. and Lavalin Inc. He holds BSc and MSc degrees in chemical engineering from the University of Calgary.

W. Y. SVRCEK is a professor in the department of chemical and petroleum engineering at the University of Calgary (403/220-5751; Fax: 403/282-3945). He previously worked as a senior systems engineer in the control systems group of Monsanto Co. Upon leaving Monsanto, he joined the University of Western Ontario. He holds BSc and PhD degrees in chemical engineering from the University of Alberta, Edmonton.

$$H_{LL} = \frac{0.00128\theta_{LL}(\Delta S_G)D_p^2}{\mu_L} \quad (56)$$

where D_p is in microns.

13. Calculate the difference in height between the light and heavy liquid weirs:

$$\Delta H = H_{LL} \left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_H} \right) \quad (57)$$

14. Design the light liquid bucket: Set the top of light liquid weir = $D - H_V$; assume the bottom is at $0.125D$; assume a holdup/surge (typically, 5–15 min.); assume H_{LL} is 6 in. below the weir height and LLL is 6 in. above the bottom of the bucket. Using Table 3 with H_{HLL}/D and H_{LLL}/D , calculate A_{HLL} and A_{LLL} . Calculate L_2 :

$$L_2 = \frac{(T_H + T_S)Q_{LL}}{(A_{HLL} - A_{LLL})} \quad (58)$$

15. Assume L_3 is the larger of $D/12$ or 12 in.

16. Design the heavy liquid compartment: Set the top of the heavy liquid weir = $D - H_V - \Delta H$; assume a holdup/surge (typically, 5–15 min.); assume H_{LL} is about 6 in. below the weir height and LLL is about 6 in. above the bottom of the vessel. Using Table 3 with H_{HLL}/D and H_{LLL}/D , calculate A_{HLL} and A_{LLL} .

Calculate L_4 :

$$L_4 = \frac{(T_H + T_S)Q_{HL}}{(A_{HLL} - A_{LLL})} \quad (59)$$

17. Calculate $L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4$.

18. Calculate L/D . If $L/D \ll 1.5$,

Nomenclature

A = vertical vessel cross-sectional area, ft^2	Q = volumetric flow, ft^3/s or ft^3/min
A_D = downcomer cross-sectional area, ft^2	S = vessel material stress value, psi
A_{LLV} = area of light liquid above vessel bottom, ft^2	ΔS_G = specific gravity difference between light and heavy liquids
A_T = total cross-sectional area, ft^2	t_C = corrosion allowance, in.
C_D = drag coefficient, dimensionless	t_H = head thickness, in.
d_N = nozzle dia., in. (inlet or outlet vapor/liquid as specified)	t_{HL} = settling time for heavy liquid droplets out of light liquid, min
D = vessel diameter, ft or in.	t_{LH} = rise time for light liquid droplets out of heavy liquid, min
D_B = boot dia., ft	t_S = shell thickness, in.
D_p = droplet dia., ft, or microns	T_H = holdup time, min
D_{VD} = vapor disengagement dia., ft	T_S = surge time, min.
E = welded joint efficiency, dimensionless	U_{AH} = allowable horizontal velocity, ft/s
g_c = gravitational constant, 32.17 ft/s^2	U_{HL} = settling velocity of heavy liquid droplets out of light liquid, in./min
G = baffle liquid load, gph/ft^2	U_{LH} = rising velocity of light liquid droplets out of heavy liquid, in./min
H = height, ft	U_M = mixture velocity, ft/s
H_A = liquid level above baffle, in. or ft	U_p = boot velocity, in./min
H_{BN} = liquid height from above baffle to feed nozzle, ft	U_T = terminal velocity, ft/s or in./min
H_D = disengagement height, ft	U_V = vapor velocity, ft/s
H_H = holdup height, ft	U_{VA} = actual vapor velocity, ft/s
H_L = height from liquid interface to LL nozzle, ft	V_H = holdup volume, ft^3
H_{LHN} = HLL to inlet nozzle centerline height, ft	V_{LLL} = LLL volume, ft^3
H_{LLB} = light liquid height in boot, ft	V_S = surge volume, ft^3
H_{LLT} = light layer thickness, in.	W = vessel weight, lb
H_{LLV} = light liquid height in vessel, ft	W_D = downcomer chord width, in.
H_{ME} = mist eliminator to top tan. height, ft	
H_R = height from light liquid nozzle to baffle, ft	
H_S = surge height, ft	
H_T = total vertical separator height, ft	
H_V = vapor disengagement area height, ft	
H_W = weir height, ft	
ΔH = height difference between light and heavy liquid weirs, in.	
k_S = Stokes' law terminal velocity constant, $(\text{in./min})(\text{cP})/(\text{lb/ft}^3)$	
K = terminal velocity constant, ft/s	
L = vessel length, ft	
L_{MIN} = vapor/liquid separation minimum length, ft	
L_{1-4} = as defined in Figure 2	
P = pressure, psig or psia	
	Greek letters
	θ = liquid residence time, min
	λ = mixture liquid fraction
	μ = viscosity, cP
	ρ = density, lb/ft^3
	ϕ = liquid dropout time, s
	Subscripts
	H, HL = heavy liquid
	HLL = high liquid level
	L, LL = light liquid
	LLL = low liquid level
	M = mixture
	NLL = normal liquid level
	V = vapor

then decrease D and repeat from Step 5. If $L/D \gg 6.0$, then increase D and repeat from Step 5.

19. Calculate the thickness of the shell and heads according to Table 8.

20. Calculate the surface area of

Table 10. Data for Example 2.

Component	Mass Flow, lb/h	ρ , lb/ft ³	μ , cP
Hydrocarbon vapor	$W_V = 235,000$	$\rho_V = 0.190$	—
Hydrocarbon liquid	$W_{LL} = 45,000$	$\rho_L = 40.5$	$\mu_L = 0.24$
Water	$W_{HL} = 7,500$	$\rho_H = 62.0$	$\mu_H = 0.682$

shell and heads according to Table 8.

21. Calculate the approximate vessel weight according to Table 8.

22. Increase or decrease the diameter by 6-in. increments and repeat the calculations until L/D ranges from 1.5–6.0.

Example 2

Design a three-phase horizontal separator with a weir to separate the mixture in Table 10. The operating pressure and temperature are 25 psig and 100, respectively, and it is necessary to have a liquid holdup and surge time of 15 min.

1. See Eq. E8, box, p. 38
2. See Eqs. E9 and E10, box, p. 38
3. $K = 0.175$ (the Gas Processors Suppliers' Association value in Table 2 was divided by 2 since there is no mist eliminator).
See Eq. E11, box, p. 38
 $U_V = 0.75 \times 2.55 = 1.91$ ft/s
4. Holdup + surge as specified = 15 min.
 $V_H + V_S = (15 \text{ min}) (18.52 \text{ ft}^3/\text{min}) = 277.80 \text{ ft}^3$
Assume 10 min holdup, 5 min surge.
5. Assume $L/D = 1.7$.
See Eq. E12, box, p. 38
 $A_T = \pi/4 (11.0 \text{ ft})^2 = 95.03 \text{ ft}^2$
6. Since the mass rate of vapor is

about 82% of the loading, set H_V to be much greater than the minimum. Assume $H_V = 0.70D = (0.70)(11.0 \text{ ft}) = 7.70 \text{ ft}$. Using Table 3, $A_V/A_T = 0.748$, $A_V = 71.08 \text{ ft}^2$.

7. $H_{LLL} = (0.5)(11.0) + 7 = 12.5$ in., use 13 in.
 $H_{LLL}/D = 13/(11.0 \times 12) = 0.098$
Using Table 3, $A_{LLL}/A_T = 0.051$
 $A_{LLL} = (0.051)(95.03 \text{ ft}^2) = 4.85 \text{ ft}^2$
8. $H_W = 11.0 - 7.70 = 3.30 \text{ ft}$
9. See Eq. E13, box, p. 38
Use $L_2 = 15.0 \text{ ft}$.
10. $H_{III} = H_{II} = 3.30/2 = 1.65 \text{ ft}$
11. $H_{III}/D = 1.65/11.0 = 0.150$
From Table 3, $A_{III}/A_T = 0.094$
 $A_{III} = (0.094)(95.03 \text{ ft}^2) = 8.93 \text{ ft}^2$
 $A_{LL} = 95.03 - 71.08 - 8.93 = 15.02 \text{ ft}^2$
12. From Table 1, $k_S = 0.333$
 $U_{III} = (0.333)(62.0 - 40.5)/0.24 = 29.83$ in./min
Use 10 in./min (maximum)
 $U_{LII} = (0.333)(62.0 - 40.5)/0.682 = 10.50$ in./min
Use 10 in./min (maximum)
13. $t_{III} = (12 \text{ in./ft})(1.65 \text{ ft})/10$ in./min = 1.98 min, use 2.0 mins
 $t_{LII} = t_{III} = 2.0 \text{ min}$
14. See Eqs. E14 and E15, box, p. 38
Use $L_1 = 3.0 \text{ ft}$.
15. $L = 3.0 + 15.0 = 18.0 \text{ ft}$
16. $\phi = 7.70 \text{ ft}/1.91 \text{ ft/s} = 4.03 \text{ s}$
17. See Eq. E16, box, p. 38

Table 11. Selection of vessel heads.

Conditions	Typical Heads Used
$D < 15 \text{ ft}$ and $P < 100 \text{ psig}$	Dished with knuckle radius = $0.06 D$
$D < 15 \text{ ft}$ and $P > 100 \text{ psig}$	2:1 Elliptical
$D > 15 \text{ ft}$, regardless of pressure	Hemispherical

where: P = design pressure and D = drum dia.

18. $L_{MIN} = (4.83 \text{ ft/s})(4.03 \text{ s}) = 19.5 \text{ ft}$

19. Since $L < L_{MIN}$, set $L = 19.5 \text{ ft}$ (set $L_2 = 16.0 \text{ ft}$, $L_1 = 3.5 \text{ ft}$)

20. $L/D = 19.5/11.0 = 1.78$

21. Assume dished heads per Table 11.

Assume $E = 0.85$
Use SA-516 70 carbon steel, design temperature = 650°

$S = 17,500$ psi; from Ref. (3).

Corrosion allowance = $1/16$ in.

$P = 25 + 30 = 55$ psig

See Eq. E17, box on this page.

Use $t_S = 3/8$ in.

See Eq. E18, box on this page.

Use $t_H = 1/2$ in.; use $t = 1/2$ in.

22. $A_S = \pi(11.0 \text{ ft})(19.5 \text{ ft}) = 673.87 \text{ ft}^2$

$A_H = (0.842)(11.0 \text{ ft})^2 = 101.88 \text{ ft}^2$

23. See Eq. E19, box on this page.

24. In this example, calculations were performed for only one diameter. However, nearly the minimum L/D corresponded to a diameter of 11.0 ft; therefore, the next diameter should be smaller, resulting in a larger L/D . Also, calculations should be performed using a diameter of 11.5 ft.

25. For the light liquid compartment:

$H_{III} = H_W = 3.3 \text{ ft} \sim 3 \text{ ft}, 4 \text{ in.}$

$A_{NLL} = 4.85 + 185.20/16.0 = 16.43 \text{ ft}^2$

$A_{NLL}/A_T = 16.43/95.03 = 0.173$

Using Table 3, $H_{NLL}/D = 0.229$

$H_{NLL} = (0.229)(11.0) = 2.52 \text{ ft} \sim 2 \text{ ft}, 6 \text{ in.}$

$H_{LLL} = 13 \text{ in.}$

Comment: Due to the small amount of heavy liquid and large amount of vapor, a better design would have used a boot. A vertical vessel should be compared, as well.

CEP

$$t_S = \frac{55 \times 132}{2 \times 17,500 \times 0.85 - 1.2 \times 55} + 1/16 = 0.307 \text{ in.}$$

■ Equation E17

$$t_H = \frac{0.885 \times 55 \times 132}{2 \times 17,500 \times 0.85 - 0.1 \times 55} + 1/16 = 0.495 \text{ in.}$$

■ Equation E18

$$W = \frac{490 \text{ lb}}{\text{ft}^3} \times \frac{0.500 \text{ in.}}{12 \text{ in./ft}} \left(673.87 \text{ ft}^2 + 2 \times 101.88 \text{ ft}^2 \right) = 17,920 \text{ lb}$$

■ Equation E19

To receive a free copy of this article, send in the Reader Inquiry card in this issue with the number 153 circled.