

**DESARROLLO DE UN SOFTWARE DIDÁCTICO PARA EL DISEÑO MODERNO  
DE SEPARADORES BIFÁSICOS Y TRIFÁSICOS.**

**GIORGIO A. ROSSI ACUÑA**

**JUAN FELIPE RANGEL ALZATE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2016**

**DESARROLLO DE UN SOFTWARE DIDÁCTICO PARA EL DISEÑO MODERNO  
DE SEPARADORES BIFÁSICOS Y TRIFÁSICOS.**

**GIORGIO A. ROSSI ACUÑA**

**JUAN FELIPE RANGEL ALZATE**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero de Petróleos**

**Director**

**MSc. MANUEL E. CABARCAS SIMANCAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2016**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>15</b>
<b>1. PARÁMETROS CONCEPTUALES QUE INFLUYEN EN LA SEPARACIÓN DE FLUIDOS</b> .....	<b>17</b>
1.1. TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DE LÍQUIDO. ....	17
1.2. RÉGIMEN DE FLUJO.....	19
1.3. VELOCIDAD TERMINAL.....	20
1.4. PRESIÓN DE SEPARACIÓN. ....	22
1.5. TEMPERATURA DE SEPARACIÓN. ....	22
1.6. DENSIDAD DEL FLUIDO. ....	23
1.7. VISCOSIDAD DEL FLUIDO.....	23
<b>2. PARÁMETROS DE DISEÑO DE LOS SEPARADORES</b> .....	<b>24</b>
2.1. GRADO DE SEPARACIÓN .....	24
2.1.1. Separación gas-liquido. ....	24
2.1.2. Separación líquidos no miscibles. ....	26
2.2. GEOMETRIA DEL SEPARADOR.....	27
2.3. SECCIONES INTERNAS DE UN SEPARADOR CONVENCIONAL QUE INTERVIENEN EN EL DIMENSIONAMIENTO.....	29
2.3.1. Tubería de alimentación. ....	29
2.3.2. Dispositivo de entrada. ....	31
2.3.3. Sección de asentamiento gravitacional del gas. ....	33
2.3.4. Extractor de niebla. ....	43
2.3.5. Sección de recolección de líquido. ....	47
2.4. TIEMPO DE RETENCIÓN. ....	49
2.5. LONGITUD ENTRE COSTURAS Y LONGITUD EFECTIVA.....	51
2.6. RELACIÓN DE ESBELTEZ. ....	53
<b>3. MODELOS MATEMÁTICOS</b> .....	<b>54</b>
3.1. DIMENSIONAMIENTO DE BOQUILLAS DE ENTRADA Y SALIDA.....	54

3.2. DISEÑO DE SEPARADORES BIFÁSICOS .....	56
3.2.1. Diseño de un separador bifásico vertical.	56
3.2.2. Diseño de un separador bifásico horizontal.	63
3.3. DISEÑO DE SEPARADORES TRIFÁSICOS.....	69
3.3.1. Diseño de un separador trifásico vertical.	70
3.3.2. Diseño de un separador trifásico horizontal.	73
<b>4. DESARROLLO DEL SOFTWARE.....</b>	<b>77</b>
4.1. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SOFTWARE.....	77
4.2. GUÍA DE USO .....	77
4.3. VALIDACIÓN DEL SOFTWARE.....	85
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>88</b>
<b>6. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>89</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>90</b>

## TABLA DE FIGURAS

<b>Figura. 1</b> -Crecimiento de la capa de agua respecto al tiempo	<b>27</b>
<b>Figura. 2</b> -Esquema de un separador Horizontal.	<b>30</b>
<b>Figura. 3</b> -Esquema de un Separador Vertical.	<b>30</b>
<b>Figura. 4</b> -Tipos de Dispositivos de Entrada.	<b>32</b>
<b>Figura. 5</b> -Tipos de Dispositivos de Entrada.	<b>37</b>
<b>Figura. 6</b> -Extractor de Niebla de tipo ciclónico.	<b>47</b>
<b>Figura. 7</b> -Alturas mínimas y de Seguridad de un Separador.	<b>61</b>
<b>Figura. 8</b> -Captura de la pantalla principal.	<b>78</b>
<b>Figura. 9</b> -Captura de la ventana de datos de entrada.	<b>79</b>
<b>Figura. 10</b> -Captura de la ventana de diseño	<b>80</b>
<b>Figura. 11</b> -Captura de la ventana de la selección de los dispositivos	<b>81</b>
<b>Figura. 12</b> -Captura de la ventana de la sección de gas	<b>81</b>
<b>Figura. 13</b> -Captura de la ventana de la sección de líquido	<b>82</b>
<b>Figura. 14</b> -Captura de la ventana de la ventana diseñar	<b>83</b>
<b>Figura. 15</b> -Captura de la ventana de los datos del diseño del separador	<b>84</b>
<b>Figura. 16</b> -Captura de la ventana de la pestaña de las propiedades	<b>84</b>

## TABLA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1.</b> Esquema del balance de fuerzas que actúan sobre una gota fluyendo en la corriente de gas en sentido vertical.	<b>21</b>
<b>Gráfico 2.</b> Relación entre Coeficiente de Arrastre ( $C_d$ ) y número de Reynolds ( $Re$ ) para esferas.	<b>36</b>
<b>Gráfico 3.</b> Factor $K_s$ en función de la presión y tamaño de gota de líquido para separadores verticales ( $K_{sv}$ ).	<b>41</b>
<b>Gráfico 4.</b> Separador Horizontal Bifásico con las longitudes	<b>52</b>
<b>Gráfico 5.</b> Alturas para un separador Vertical	<b>63</b>
<b>Gráfico 6.</b> Gráfica de Llenado ( $h/D$ ) vs. Fracción de área transversal ocupada por el líquido ( $M$ )	<b>65</b>
<b>Gráfico 7.</b> Diagrama de bloques del Software.	<b>78</b>

## TABLA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> -Ventajas y desventajas de los separadores verticales y horizontales.	<b>28</b>
<b>Cuadro 2.</b> -Límites del momentum para los dispositivos de entrada.	<b>33</b>
<b>Cuadro 3.</b> -Ecuaciones de la Velocidad Terminal para las distintas regiones de la Ley de Asentamiento.	<b>36</b>
<b>Cuadro 4.</b> -Rangos para el factor Ks según API 12J.	<b>40</b>
<b>Cuadro 5.</b> -Valor de los coeficientes para las ecuaciones polinómicas.	<b>42</b>
<b>Cuadro 6.</b> -Parámetros de diseño para un Extractor Tipo Malla.	<b>45</b>
<b>Cuadro 7.</b> -Parámetros de diseño para un Extractor Tipo Aspas.	<b>45</b>
<b>Cuadro 8.</b> -Parámetros de diseño para un Extractor Tipo Ciclón.	<b>46</b>
<b>Cuadro 9.</b> -Tiempos de retención en función de la gravedad API para separadores bifásicos.	<b>50</b>
<b>Cuadro 10.</b> -Tiempos de retención en función de la gravedad API para separadores trifásicos.	<b>50</b>
<b>Cuadro 11.</b> -Rangos para la Relación de Esbeltez según el tipo de separador	<b>53</b>
<b>Cuadro 12.</b> -Factor A para los diferentes Dispositivos de Entrada.	<b>55</b>
<b>Cuadro 13.</b> -Diámetros Comerciales.	<b>69</b>
<b>Cuadro 14.</b> -Datos de Entrada para el diseño (Validación).	<b>85</b>
<b>Cuadro 15.</b> -Resultados del Diseño para un Separador Bifásico Vertical (Validación).	<b>86</b>
<b>Cuadro 16.</b> -Resultados del Diseño para un Separador Bifásico Horizontal (Validación).	<b>86</b>

**Cuadro 17.** -Resultados del Diseño para un Separador Trifásico Vertical (Validación). **87**

**Cuadro 18.** -Resultados del Diseño para un Separador Trifásico Horizontal (Validación). **87**

## TABLA DE ANEXOS

Nota: *Los anexos se encuentran en la carpeta externa dentro del CD-ROM llamada ANEXOS.*

**Anexo A.** – Manual del Usuario.

## RESUMEN

**TITULO:** DESARROLLO DE UN SOFTWARE DIDÁCTICO PARA EL DISEÑO MODERNO DE SEPARADORES BIFÁSICOS Y TRIFÁSICOS\*

**AUTOR:** JUAN FELIPE RANGEL ALZATE

GIORGIO ROSSI ACUÑA\*\*

**PALABRAS CLAVES:** SEPARADOR, BIFÁSICO, TRIFÁSICO, DISEÑO MODERNO, SOFTWARE.

### **DESCRIPCIÓN:**

Para el diseño de un separador bifásico o trifásico se requieren las especificaciones a las que este se tendrá que encontrar en su vida útil, pero debido a la gran cantidad de variables e incertidumbre de estas, suele prevalecer la perspicacia del diseñador y sus conocimientos empíricos, esto se ve reflejado en metodologías fuera de lo común como lo es el método de Souders-Brown, que relaciona la información obtenida en la aplicación de ciertos separadores con condiciones únicas con información teórica. Para que el estudiante tenga claridad de que usar este método sigue siendo en mayor parte trabajo de la persona que está encargada del diseño y los resultados no son responsabilidad del método, debe entender el margen de uso que este tiene, comparándolo con métodos convencionales de diseño como lo es la teoría de asentamiento de la gota.

Por consiguiente surgió la idea de desarrollar una herramienta virtual capaz de realizar un procedimiento, el cual relacione estos tipos de metodologías integrándolas en un diseño moderno y que a la vez provea información fundamental para entender las características del separador que se esté diseñando, el resultado final fue el software llamado HYSEP.

Este software es capaz de captar las variables relacionadas con el diseño, mostrar datos importantes para este, datos relacionados con los fluidos y exportar en formatos predeterminados los resultados del diseño final, permitiendo al estudiante una posterior comparación con otros resultados y un análisis más profundo de estos.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos,  
Director: Manuel Enrique Cabarcas Simancas

## ABSTRACT

**TITLE:** DEVELOPMENT OF EDUCATIONAL SOFTWARE FOR THE MODERN DESIGN OF TWO-PHASE AND THREE-PHASE SEPARATORS\*

**AUTHOR:** JUAN FELIPE RANGEL ALZATE

GIORGIO ROSSI ACUÑA\*\*

**KEYWORDS:** SEPARATOR, TWO-PHASE, THREE-PHASE, MODERN DESIGN, SOFTWARE.

### **DESCRIPTION:**

For the design of a two-phase or three-phase separator specifications to which this will have to be found in life are required, but due to the large number of variables and uncertainty of these, usually prevails insight designer and empirical knowledge, this is reflected in methodologies unusual as is the Souders-Brown method, which relates the information obtained from the application of certain separators with unique conditions with theoretical information. For the student is clear that using this method is still much work the person who is responsible for the design and the results are not the responsibility of the method, you must understand the range of use that it has, compared to conventional design methods as is the theory of droplet settling.

Thus it emerged the idea of developing a virtual tool capable of performing a procedure, which relates these types of integrating methodologies in modern design and at the same time provide essential information to understand the characteristics of the separator being designed, the end result the software was called HYSEP.

This software is able to capture the variables related to the design, show important data for this, data related to fluids and export in default the results of the final design formats, allowing the student later comparison with other results and further analysis of these.

---

+ Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos,  
Advisor: Manuel Enrique Cabarcas Simancas

## INTRODUCCIÓN

El mejoramiento de las metodologías pedagógicas en el ámbito académico, constituye una necesidad siempre presente en el desarrollo del perfil de un profesional egresado, el cual debe adquirir valiosas cualidades que puedan ser utilizadas a lo largo de su vida.

Una de las cualidades más importantes fomentadas en la enseñanza integral de un ingeniero, es la habilidad de afrontar problemas y solucionarlos de una manera ética y efectiva.

En el ámbito profesional existen diferentes problemas debido a las incongruencias entre los conocimientos teóricos y los empíricos adquiridos, por esta razón, el profesional debe ser capaz de proponer procedimientos que ayuden a la correcta solución de estos.

La descripción del desempeño de un separador, es un ejemplo de este tipo de situaciones, debido a la gran cantidad de variables presentes en la predicción del comportamiento de un fluido, dificulta la tarea de postular soluciones universales para todo tipo de condiciones que puedan presentarse.

El diseño de sistemas de tratamiento en general, logra integrar el conocimiento teórico y el empírico adquirido, mediante la investigación académica, por en cuanto, su contraparte empírica, se refleja en la perspicacia y experiencia del profesional encargado.

Diferentes descripciones del comportamiento de un fluido en un separador, se pueden encontrar en la literatura, que afirman que el procedimiento ideal para una situación dada que se pueda presentar, corresponde a su descripción propuesta, aun así, esta descripción depende en su mayoría de analogías, es decir, de situaciones similares que se ajusten.

A partir de lo mencionado anteriormente, el presente trabajo se encaminó hacia el planteamiento de un diseño moderno de un separador de un fluido multifásico, que logre integrar los conocimientos teóricos y empíricos, dejando el desarrollo de este procedimiento a consideración del estudiante.

Esto con el fin de desarrollar cualidades en el perfil profesional del egresado, se incentiva al estudiante a la búsqueda del conocimiento teórico, mediante el uso de un software con un enfoque didáctico, que permite al estudiante la toma de decisiones en el flujo modular que se le presenta en el diseño moderno de un separador convencional.

# **1. PARÁMETROS CONCEPTUALES QUE INFLUYEN EN LA SEPARACIÓN DE FLUIDOS**

Los parámetros que influyen en la separación son todas aquellas variables que de una u otra forma están presentes al momento de analizar el comportamiento de las fases presentes en el separador. La eficiencia de una separación se mide por la calidad de las fases del fluido separadas. Dicha calidad se puede definir como la cantidad del fluido presente en la fase continua de la mezcla, por consiguiente una calidad mayor conlleva a una eficiencia pobre de separación.

Existen varios factores que influyen en la incertidumbre inmersa en el diseño de separadores y en la predicción de su comportamiento, lo que resulta en la dificultad de predecir la cantidad de líquido presente como gota dentro de la fase de gas.

## **1.1. TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DE LÍQUIDO.**

El tamaño de las partículas es el factor más importante al momento de estudiar la separación entre fases, ya que de éste depende la capacidad que tiene el fluido en forma de gotas dispersas, de separarse de la fase continua mediante distintos mecanismos dependiendo de las condiciones y el tipo de fluido.

El análisis del comportamiento de la separación se basa en encontrar de alguna manera el tamaño de la partícula y su forma, ya que estas son necesarias para

modelar el dimensionamiento necesario para que se cumplan estas condiciones y lograr la separación.

Existen diversas maneras de determinar el tamaño de la partícula a separar presente en el fluido continuo, mediante la ecuación 1 se puede estimar el diámetro medio de las partículas líquidas presentes en la corriente de gas. (Kataoka, Ishi, & Mishima, 1983)<sup>1</sup>:

$$d_{v50} = 0.01 \left( \frac{\sigma}{\rho_g V_g^2} \right) Re_g^{2/3} \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{-1/3} \left( \frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{2/3} \quad (1)$$

Donde,

$d_{v50}$ : Diámetro medio, ft,

$\sigma$ : Tensión superficial del líquido, poundal/ft,

$\rho_g$ : Densidad del gas, lb/ft<sup>3</sup>.

$V_g$ : Velocidad del gas, ft/s,

$\rho_l$ : Densidad del líquido, lb/ft<sup>3</sup>,

$\mu_g$ : Viscosidad del gas, lb/ft-s,

Re: Número de Reynolds, valor adimensional.

Ésta ecuación nos permite ver que el tamaño de las gotas disminuye con el incremento de la velocidad del gas, el incremento de la densidad del gas y la disminución de la tensión superficial del líquido.

---

<sup>1</sup> Kataoka et al. Generation and Size Distribution. ASME Journal of Fluids Engineering, 1983. 230-238 p.

## 1.2. RÉGIMEN DE FLUJO.

La descripción del comportamiento es muy compleja a medida que las diferentes variables que intervienen en el flujo toman valores que causan una variedad de probabilidades del estado del fluido en una situación dada.

Mediante el régimen de flujo se puede caracterizar los diferentes estados del fluido, definiendo las interacciones con las variables que intervienen en su comportamiento. La ecuación de Reynolds (Ecuación 2)<sup>2</sup> define la magnitud de la influencia de las variables en el flujo del fluido.

$$Re_g = \frac{DV_g\rho_g}{\mu_g} \quad (2)$$

Donde:

D: Diámetro interno de la tubería, ft,

Existen tres regímenes de flujo los cuales a diferentes condiciones se pueden caracterizar de la misma manera. El régimen laminar que se caracteriza por la poca energía que lleva consigo el fluido, lo cual hace que su estudio sea el más sencillo. El régimen intermedio, es aquel que a condiciones mucho mayores que el laminar, el comportamiento aún sigue siendo predecible, pudiendo a una caracterización de éste. El régimen turbulento, es aquel en donde el fluido se encuentra en un estado turbulento, llevando gran cantidad de energía, generando

---

<sup>2</sup> Bothamley, M., & Campbell, J. Gas/Liquid Separators: Quantifying Separation Performance Part I. PetroSkills. 25 p.

choques entre las partículas, y en el caso que se trate de un fluido multifásico, una mayor transferencia de masa entre fases.

### 1.3. VELOCIDAD TERMINAL

A medida que el gas va fluyendo a través del separador, existen dos fuerzas opuestas actuando en una gota de líquido: La fuerza gravitacional y la fuerza de Arrastre. La fuerza gravitacional, también llamada fuerza boyante negativa, actúa hacia abajo para acelerar la gota, cuya ecuación es la siguiente.

$$F_G = \frac{\pi g D_p^3 (\rho_l - \rho_g)}{6 g_c} \quad (3)$$

La fuerza de arrastre actúa en dirección opuesta en el caso de flujos verticales ascendentes (separador vertical) o perpendicular en el caso de flujos horizontales (separador horizontal), y se describe mediante la siguiente ecuación (Arnold & Stewart, 2008)<sup>3</sup>

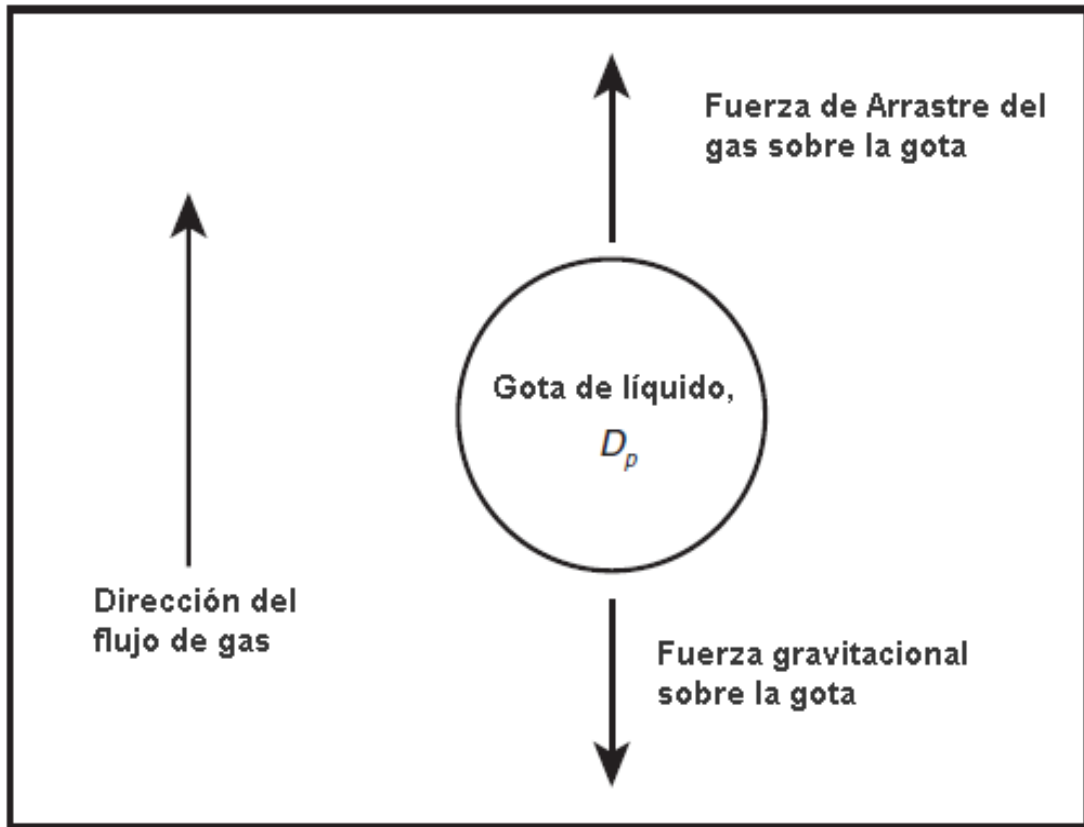
$$F_D = \frac{\pi C_D D_o^2 \rho_g V^2}{8 g_c} \quad (4)$$

El esquema de las fuerzas de arrastre y gravitacional actuando sobre una partícula de líquido, se puede observar en la figura 1.

---

<sup>3</sup> ARNOLD, K. Surface Production Operations. 3ed. ELSEVIER. 2008

Gráfico 1. Esquema del balance de fuerzas que actúan sobre una gota fluyendo en la corriente de gas en sentido vertical.



Fuente: Modificado de BOTHAMLEY, M. Gas/Liquid Separators: Quantifying Separation Performance Part II. PetroSkills. p. 37

Cuando la fuerza gravitacional,  $F_G$ , se iguala a la fuerza de arrastre,  $F_D$ , la aceleración de la gota de líquido es igual a cero y la gota se asentará a una velocidad constante "terminal" o "de asentamiento". La siguiente ecuación representa la velocidad de asentamiento de una gota.

$$V_t = \left( \frac{4gd_p}{3C_D} \right)^{0.5} \left( \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \right)^{0.5} \quad (5)$$

Un incremento en la velocidad del gas incrementará la fuerza de arrastre sobre la partícula,  $C_D$ , dicho incremento resultará en una reducción inicial en la velocidad de asentamiento de la partícula,  $V_t$ , además de causar que la gota se mueva en dirección a la fuerza de arrastre. La misma teoría se aplica para flujos de gas horizontal, con la diferencia de que en este las fuerzas operan perpendicularmente.

#### **1.4. PRESIÓN DE SEPARACIÓN.**

Es uno de los factores más importantes en la separación, desde el punto de vista de la recuperación de líquidos, ya que a ciertas condiciones siempre se puede hablar de una presión óptima de separación.

En ocasiones al disminuir la presión de separación, principalmente en la separación de gas y líquido, la recuperación de líquidos aumenta. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que también se libera una cierta cantidad de componentes livianos del líquido en forma de gas, que disminuyen la capacidad calorífica del crudo, por consiguiente su valor comercial.

#### **1.5. TEMPERATURA DE SEPARACIÓN.**

La temperatura afecta la capacidad del separador al variar los volúmenes de fluido y sus densidades. El efecto neto de un aumento en la temperatura de separación es la disminución de capacidad en la separación de gas.

A medida que disminuye la temperatura de separación, se incrementa la recuperación de líquidos en el separador. Sin embargo, la disminución de la temperatura requiere equipos adicionales para el enfriamiento, además puede conllevar a la formación de hidratos.

#### **1.6. DENSIDAD DEL FLUIDO.**

La diferencia de densidades entre los fluidos involucrados en la separación es fundamental ya que de esta depende el principal mecanismo de separación, la fuerza gravitacional, puesto que al existir diferencia de densidades, una mayor que la otra, facilita el trabajo de la gravedad para separar las fases, ya sean fases líquidas o la interacción de gas-líquido.

#### **1.7. VISCOSIDAD DEL FLUIDO**

La viscosidad está definida como la facilidad o dificultad que tiene un fluido en específico al flujo. Cuando se habla de partículas independientes, la facilidad de fluir está determinada por la disponibilidad de la fase continua a dejar fluir la partícula dentro de sí. Si la viscosidad de esta fase es demasiado alta, dificultará el movimiento de la partícula a través de ella. Este fenómeno se puede evidenciar principalmente en las mezclas de fluidos líquidos no miscibles como es el crudo aceite y el agua.

## 2. PARÁMETROS DE DISEÑO DE LOS SEPARADORES

La complejidad del comportamiento de un separador ya sea bifásico o trifásico, en la mayoría de los casos depende principalmente de la experiencia del encargado del diseño, para recrear sistemas que sean compatibles con los tipos únicos de fluidos que se pueden encontrar en la industria, y las situaciones adversas que puedan ocurrir en el transcurso del tratamiento. El diseño de los separadores convencionales busca proponer un sistema de separación teórico o inicial, tratando en lo más posible de que se ajuste en medida del conocimiento empírico.

### 2.1. GRADO DE SEPARACIÓN

La principal función de un separador es la de separar las diferentes fases de una mezcla, ya sea gas o líquido. Dependiendo del grado de la separación requerida el enfoque del dimensionamiento de un separador convencional cambia drásticamente, ya que al abarcar más condiciones para la separación entre fases, éste separador debe cumplir con más requerimientos dados por las fases individuales.

**2.1.1. Separación gas-líquido.** En el capítulo anterior se habló de los conceptos esenciales para la descripción de la separación de una gota de líquido de la fase gaseosa. Para la separación de las gotas de líquido es necesario que el gas lleve una velocidad de flujo lo suficientemente baja para que la fase líquida tenga el tiempo necesario para asentarse. Sin embargo, tener velocidades bajas de fluido requiere de un mayor volumen del separador, lo que es contraproducente para los propósitos del dimensionamiento de un separador, de lo que se hablara más adelante.

Para la cuantificación de las fuerzas involucradas en el proceso de separación gas-líquido, conocida como separación bifásica, se plantea la Ley de Stokes, la cual describe el comportamiento del régimen de flujo laminar.

Para que ocurra el asentamiento a una velocidad constante, la aceleración resultante entre las fuerzas que actúan sobre una gota (partícula esférica) de líquido en la fase gas, se debe partir de que la sumatoria de fuerzas es igual a cero.

$$F_D = F_G \quad (6)$$

La fuerza de arrastre  $F_D$ , se expresa de la siguiente manera:

$$F_D = F_G A_P \rho_L V^2 / 2g_c \quad (7)$$

El área transversal de la gota  $A_P$ , está definida por:

$$A_P = (\pi/4)D_P^2 \quad (8)$$

La fuerza de gravedad  $F_G$ , se define por:

$$F_G = (\rho_L - \rho_G)V_P g/g_c \quad (9)$$

El volumen de una gota o partícula esférica,  $V_P$ , es calculada por:

$$V_P = (\pi/6)D_P^3 \quad (10)$$

Haciendo la sustitución correspondiente de las ecuaciones anteriormente mencionadas, se resuelve para halla la velocidad máxima del gas ( $V_{Gmax}$ )<sup>4</sup>, que

---

<sup>4</sup> BOTHAMLEY, M. Gas/Liquid Separators: Quantifying Separation Performance Part II. PetroSkills. p. 35.

hace referencia a la velocidad máxima del gas a la cual la sumatoria de las fuerzas es igual a cero:

$$V_{G\max} = \sqrt{\left(\frac{4gD_p}{3C_D}\right)\left(\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G}\right)} \quad (11)$$

**2.1.2. Separación líquidos no miscibles.** El fenómeno de separación de fluidos líquidos no miscibles, como el aceite crudo y el agua, dependen de variables muy diferentes a la separación gas-líquido, esto debido a que los fluidos son de una naturaleza similar.

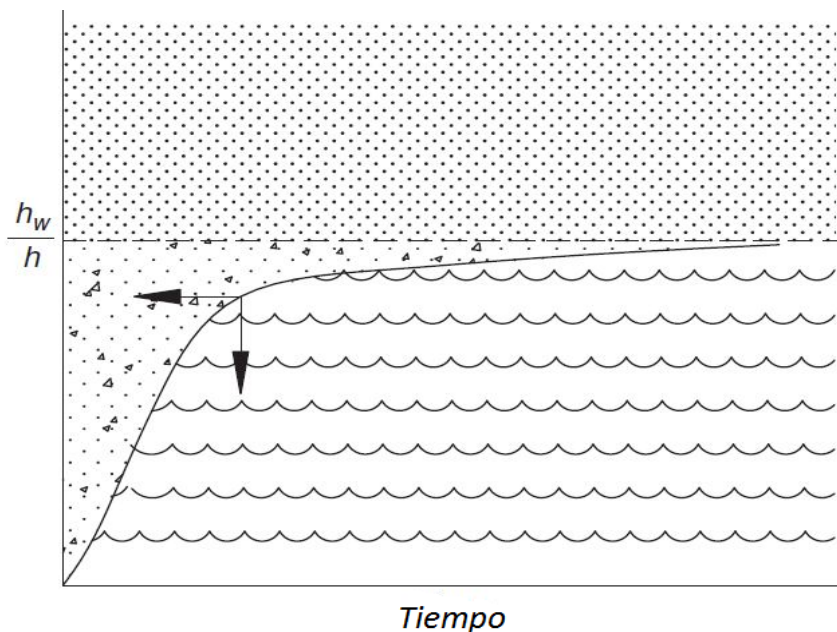
Para que exista una mezcla de fluidos no miscibles, primero se debe hablar del término emulsión, para que exista un emulsión deben existir dos factores muy importante como lo son, un coagulante y una energía de agitación.

El coagulante puede provenir de diferentes fuentes como lo son impurezas dentro del aceite o componentes hidrocarburos propios de aceites de alta densidad, mientras que la energía de agitación proviene del flujo a altas velocidades.

Por consiguiente para deshacer una emulsión se debe tener en cuenta estos dos factores. El coagulante se combate con procedimientos previos al separador que no serán mencionados. La energía de agitación como su nombre lo dice, proviene de la agitación a la que el fluido se encuentre expuesto, la solución más razonable es deshacer la energía de alguna manera y evitar cualquier tipo de agitación dentro del separador, cumpliendo con estas dos ideas, el fluido puede llegar a un equilibrio entre fases, y mediante diferencia de densidades las gotas de fluido presentes en la fase opuesta, en mayor medida pueden ser separadas.

Cuando los fluidos líquidos se asientan, eventualmente aparece una capa de agua limpia en el fondo del recipiente, esto significa que la mayor cantidad de aceite ha sido separada del agua, debido a la diferencia de densidades. Sin embargo a medida que transcurre el tiempo la altura de la capa de agua libre tiende a ser constante debido a que la cantidad de agua retenida en la fase aceite, se encuentra en forma de partículas no lo suficientemente grandes para ejercer una fuerza que venza la viscosidad del aceite.

**Fig. 1 - Crecimiento de la capa de agua respecto al tiempo**



Fuente: ARNOLD, K. Surface Production Operations. 3ed. ELSEVIER. 2008, p. 132.

## 2.2. GEOMETRIA DEL SEPARADOR

La forma del separador no solo influye en la eficiencia de separación debido a que las diferentes geometrías poseen cualidades intrínsecas. Debido a esto en la actualidad las formas y tamaños de los separadores son tan diversas debido a la

gran cantidad de casos diferentes a las cuales se pueden aplicar el diseño de un separador.

En este caso se propone el uso universal de separadores convencionales de formas predeterminadas, como lo son el separador vertical y el separador horizontal.

Estos dos separadores presentan diferentes ventajas y desventajas del diseño, que pueden llevar a la preferencia de uno en especial en un caso determinado.

**Cuadro 1. - Ventajas y desventajas de los separadores verticales y horizontales.**

ORIENTACIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>HORIZONTAL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Separación gravitacional más eficiente</li> <li>▪ Manejo de crudos espumosos y emulsiones</li> <li>▪ Menor gasto de tubería</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mayor uso de área superficial</li> <li>▪ Complejo manejo de sólidos</li> </ul>
<b>VERTICAL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Manejo de sólidos</li> <li>▪ Baja reincorporación de líquido al caudal de gas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mayor gasto de tubería.</li> <li>▪ Mantenimientos más frecuentes</li> </ul>

Fuente: Autor

## **2.3. SECCIONES INTERNAS DE UN SEPARADOR CONVENCIONAL QUE INTERVIENEN EN EL DIMENSIONAMIENTO.**

Las partes internas principales de un separador convencional de fluido multifásico en el cual se pueden evidenciar mecanismos relacionados con la separación entre fases son las siguientes:

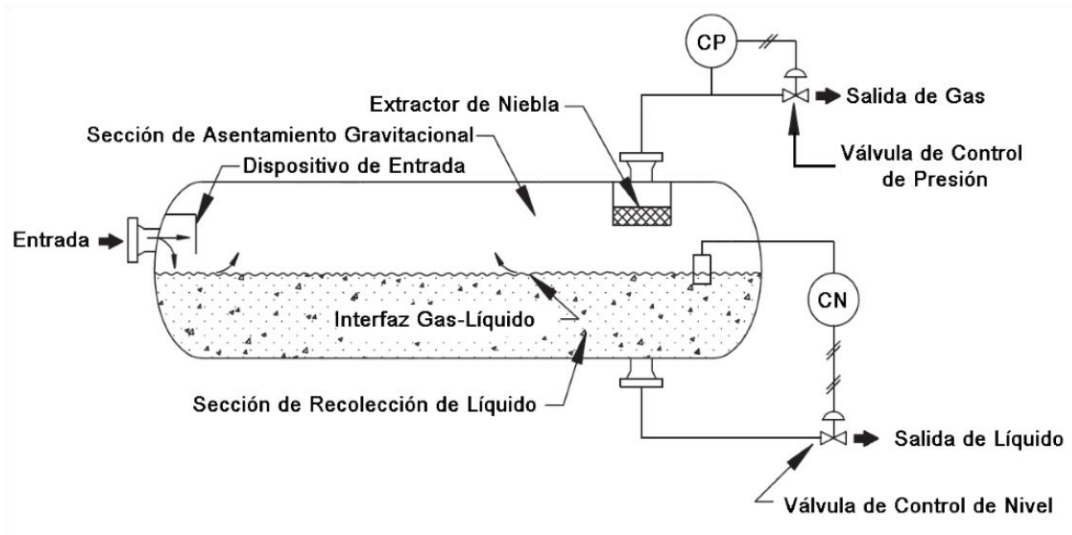
- Boquilla de entrada.
- Dispositivo de entrada (dispersor).
- Sección de asentamiento del gas.
- Sección de recolección líquido.
- Extractor de niebla.
- Boquilla de salida del gas.
- Boquilla de salida del líquido.

**2.3.1. Tubería de alimentación.** Bothamley & Campbell (2013)<sup>5</sup> identificaron que muchas veces el flujo en la tubería de alimentación no alcanza un estado estable, es decir, que se encuentre turbulento, por ejemplo, cuando existe un cambio en la dirección de flujo dentro de la tubería aguas arriba debido a la presencia de codos o accesorios, o experimentar alteraciones en el patrón de flujo. Esto ocasiona un aumento en la velocidad del gas, por consecuente, la disminución del tamaño de las gotas presentes, dificultando su asentamiento en la fase líquida.

---

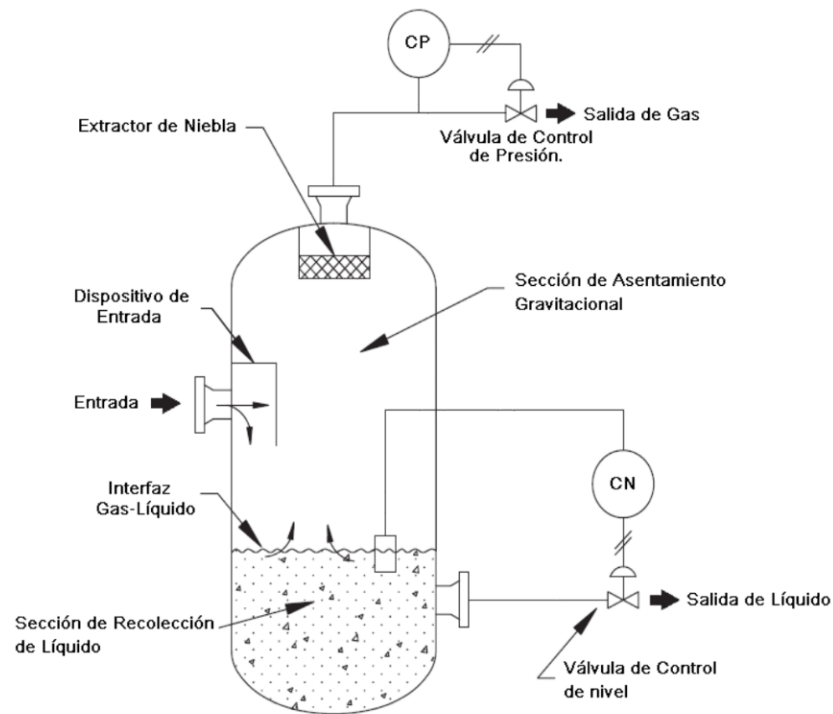
<sup>5</sup> BOTHAMLEY, M. Part I. Op. cit. p. 23.

**Fig. 2 - Esquema de un separador Horizontal.**



**Fuente: ARNOLD, K. Surface Production Operations. 3ed.**

**Fig. 3 - Esquema de un Separador Vertical.**



**Fuente: ARNOLD, K. Surface Production Operations. 3ed.**

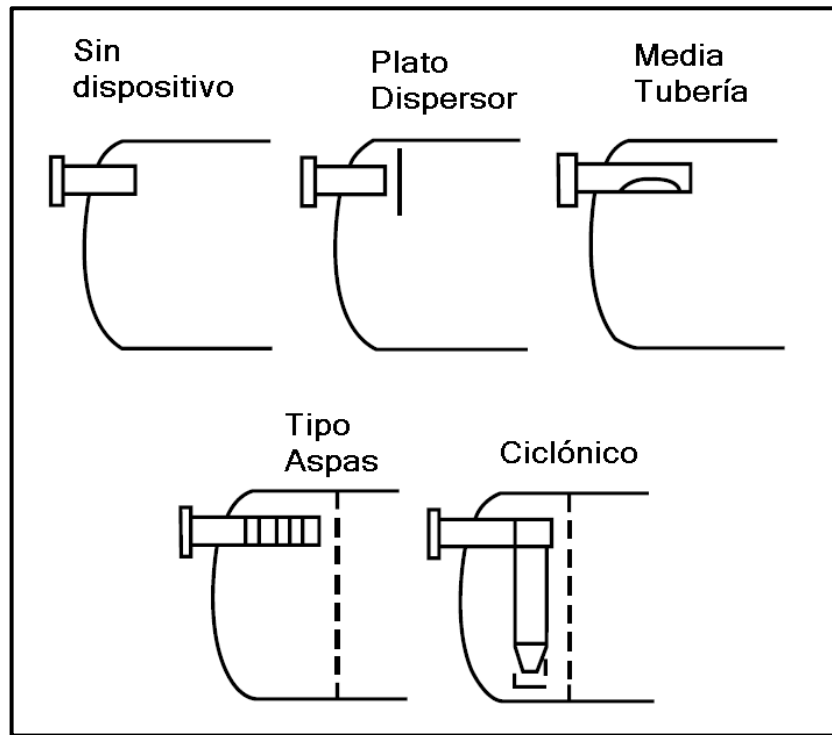
Es por esto, que dan ciertas recomendaciones que pueden evitar este problema, por ejemplo con un correcto diseño de la tubería de alimentación, para que ésta permita un flujo estratificado o en forma de ola, entre otras directrices:

- Se debe proveer la tubería de alimentación al menos 10 diámetros de longitud rectos aguas arriba de la boquilla de entrada, sin presencia de válvulas, expansiones/contracciones o codos.
- Si se requiere una válvula en la línea de alimentación cerca al separador, esta debe ser únicamente de compuerta o tipo globo.

**2.3.2. Dispositivo de entrada.** La función principal del dispositivo de entrada (Fig. 4) es tratar de aumentar la eficiencia de separación maximizando la eficiencia de separación gas/líquido basado en las condiciones de la corriente de entrada y proveyendo una buena distribución de velocidad aguas abajo en las fases separadas. Este cambia abruptamente la dirección de flujo absorbiendo el momentum del fluido, resultando en una separación inicial de líquido y gas.

Para separadores sin dispositivos de entrada, la cantidad de líquido atrapado en la fase gaseosa en forma de gas entra a la sección de asentamiento gravitacional del gas mientras que la fase líquida cae a la sección de recolección de líquido.

Fig. 4 - Tipos de Dispositivos de Entrada.



Fuente: Modificada de Bothamley y Campbell. Quantifying Separation Performance. Octubre de 2013.

El momentum, a veces referido como presión dinámica, está definido como el producto de la densidad de la mezcla por su velocidad:

$$\rho_m V_m^2 \quad (12)$$

El siguiente cuadro muestra los límites sugeridos respecto al momentum, los cuales no representan los valores deseados, pero sí valores máximos.

**Cuadro 2. - Límites del momentum para los dispositivos de entrada.**

<b>Tipo de Dispositivo de Entrada</b>	<b><math>\rho V^2, \text{lb/ft} \cdot \text{s}^2</math></b>
Sin dispositivo	700
Plato dispersor	950
Media Tubería	1,400
Tipo aspas	5,400
Tipo Ciclón	10,000

**Fuente: Bothamley & Campbell. Quantifying Separation Performance. Part I. PetroSkills. 2013**

**2.3.3. Sección de asentamiento gravitacional del gas.** Su función principal es reducir la cantidad de gotas de líquido atrapadas en la fase gaseosa que no pudieron ser removidas por el dispersor de entrada, además de mejorar y estabilizar el perfil de la velocidad del gas, además, se diseña para tamaños de gotas mayores a 100 o 140micras que caen a la interface gas-líquido.

Esta sección provee un pre-acondicionamiento del gas antes de que éste siga hacia el extractor de niebla, por tanto, es claro que los requerimientos para el rendimiento de la sección de asentamiento de gas dependen de los requerimientos para el extractor de niebla escogido. En los separadores horizontales existen límites para la velocidad del gas que fluye a través de la superficie de líquido, esto para prevenir el re-ingreso de gotas de líquido en la fase gaseosa. Es posible modificar la velocidad del gas utilizando dispositivos internos.

Si las partículas de líquido mayores de 100 micras no se separan totalmente en la sección de asentamiento gravitacional, puede ocurrir que se inunde el extractor de niebla y, como consecuencia, que haya arrastres repentinos de baches de líquido en el flujo de gas que sale del separador.

El diseño de ésta sección se basa en la ecuación de velocidad terminal descrita anteriormente y mostrada nuevamente a continuación:

$$V_t = \left( \frac{4gd_p}{3C_D} \right)^{0.5} \sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g}} \quad (13)$$

A partir de ésta ecuación se puede calcular la velocidad máxima permitida para el gas mediante dos métodos, la teoría del Asentamiento de la Gota y mediante el método de Souders – Brown.

**2.3.3.1. Teoría del asentamiento de la gota.** Esta teoría se basa en el comportamiento de la gota de líquido que fluye a través del gas, por lo que se deriva del término del coeficiente de arrastre,  $C_D$ , de la ecuación de la velocidad terminal,  $V_t$ .

El coeficiente de arrastre,  $C_D$ , es una cantidad adimensional que se usa para cuantificar el arrastre, es decir la resistencia de una partícula en un fluido de diferente naturaleza y se describe por la siguiente ecuación:

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{Re^{1/2}} + 0,34 \quad (14)$$

Éste coeficiente está en función del número de Reynolds de la gota, cuya ecuación se muestra a continuación:

$$Re_{gota} = \frac{d_p V_t \rho_g}{\mu_g} \quad (15)$$

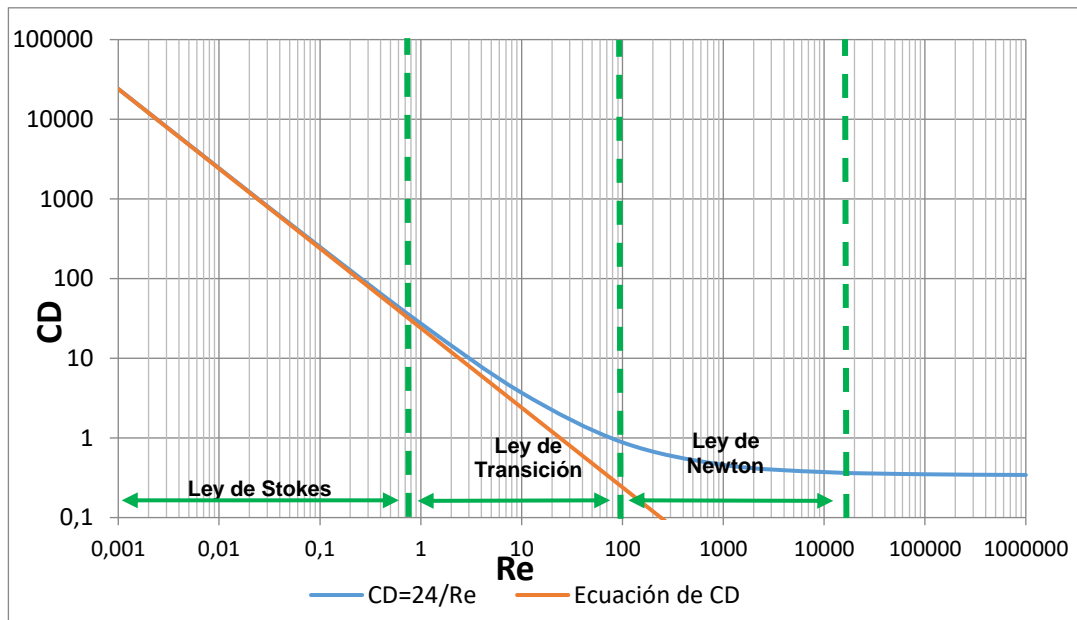
El número de Reynolds de la gota incluye la velocidad terminal, la cual se halla mediante un proceso iterativo, utilizando la ecuación del coeficiente de arrastre y la ecuación del número de Reynolds

El gráfico 2, es una gráfica que muestra la relación entre el coeficiente de arrastre y el número de Reynolds de la gota para gotas esféricas. El eje del número de Reynolds se puede dividir en las regiones asociadas con las leyes de asentamiento de Stokes, Intermedia y de Newton, tal y como explica la tabla de las velocidades terminales según la ley de asentamiento. Para diseñar la sección de asentamiento gravitacional del gas, el tamaño de gota de mayor interés recaerá sobre la región de la Ley de Transición. El cuadro 3 muestra las ecuaciones de velocidad terminal derivadas de las 3 regiones de asentamiento presentes en la gráfica de Reynolds.

El tiempo de residencia para el gas en la sección de asentamiento del gas se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$t_{r,g} = \frac{L_e}{V_g} \quad (16)$$

**Gráfico 2. Relación entre Coeficiente de Arrastre (Cd) y número de Reynolds (Re) para esferas.**



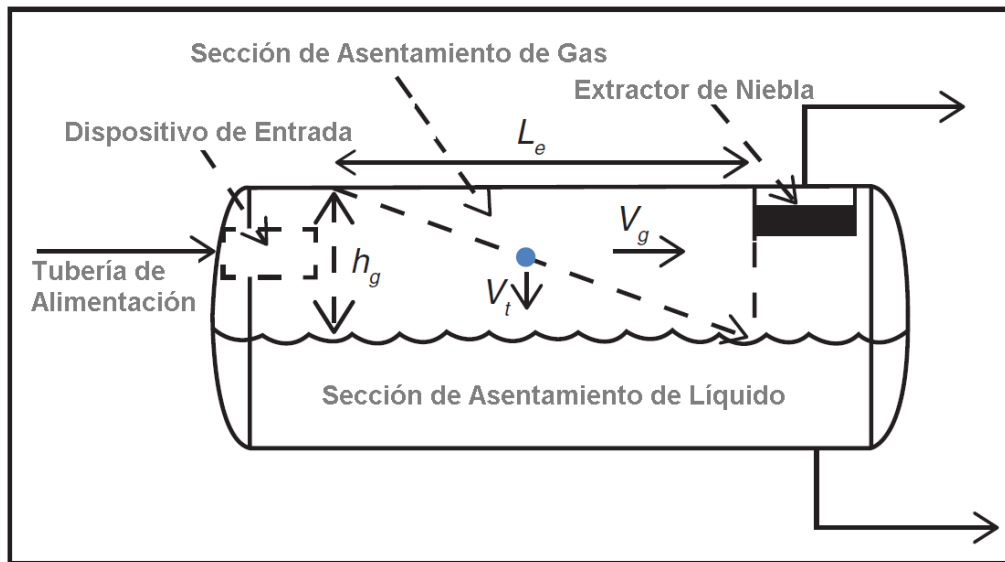
**Cuadro 3. - Ecuaciones de la Velocidad Terminal para las distintas regiones de la Ley de Asentamiento.**

Ley de Asentamiento	Número de Reynolds de la gota (Re)	Ecuación de Velocidad Terminal
Ley de Stokes	<2	$V_t = \frac{gd_p^2(\rho_l - \rho_g)}{18\mu_g}$
Ley de Transición	2 - 500	$V_t = \frac{0.1529g^{0.714}d_p^{1.142}(\rho_l - \rho_g)^{0.714}}{\rho_g^{0.266}\mu_g^{0.428}}$
Ley de Newton	500 – 200,000	$V_t = \left(\frac{4gd_p}{3C_D}\right)^{0.5} \sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g}}$

Fuente: Bothamley y Campbell. Quantifying Separation Performance. Part II. Octubre de 2013, p. 37.

Se considera que una gota de líquido es removida/separada del gas si ésta cae verticalmente hasta el nivel de líquido (h) dentro del tiempo ( $t_{r,g}$ ) que le toma al gas atravesar la longitud horizontal de la sección de asentamiento del gas ( $L_e$ ), como se observa en la figura 7.

**Fig. 5 - Tipos de Dispositivos de Entrada.**



**Fuente: Modificada de Bothamley y Campbell. Quantifying Separation Performance. Part II. Octubre de 2013, p. 37.**

Ahora, si se dice el tiempo de asentamiento de una gota con el tiempo que necesita el gas para atravesar la sección horizontal son iguales, entonces se tiene la ecuación 18<sup>6</sup>:

$$\frac{h}{V_t} = \frac{L_e}{V_g} = t_{r,g} \quad (17)$$

<sup>6</sup> BOTHAMLEY. Part II. Op. cit., p. 39.

Suponiendo que  $h$  es igual a  $h_g$ , la distancia vertical entre el nivel de líquido y el tope del separador, entonces se puede obtener la trayectoria de la gota mostrada en la figura anterior y la ecuación anterior puede ser reorganizada de la siguiente manera:

$$V_t = \frac{h_g V_g}{L_e} \quad (18)$$

Esta es la velocidad terminal (de asentamiento) de una gota correspondiente a la trayectoria mostrada en la figura 7. El valor de la velocidad terminal de asentamiento se puede substituir por la apropiada ecuación de velocidad de asentamiento en la Tabla 1 para hallar el respectivo diámetro de la gota ( $d_p$ ). Las gotas de este tamaño, incluyendo aquellas de mayor tamaño a este, serán separadas con un 100% de eficiencia para las condiciones dadas.

**2.3.3.2. Método de Souders-Brown.** Cuando se utiliza el coeficiente de arrastre para que el diseño se ajuste a un tamaño de partícula objetivo, se le conoce con el nombre de Teoría de Asentamiento de la Gota. Para aplicaciones prácticas, existe un método el cual reemplaza estos valores con un solo valor (Factor  $K_S$ ) que se halla mediante la ecuación 117 y que se basa en el conocimiento empírico, el cual tiene el nombre de Método de Souders-Brown.

$$K_S = \sqrt{\left(\frac{4gD_P}{3C_D}\right)} \quad (19)$$

Donde:

$D_P$ : diámetro de la gota, micrones.

---

<sup>7</sup> *Ibíd.*, p. 35.

g: Valor de la aceleración de la gravedad, ft/s<sup>2</sup>.

g<sub>c</sub>: Factor de conversión.

La diferencia de éste método con el del asentamiento de la gota radica en que el primer término de la ecuación de la velocidad terminal es remplazado por un factor K<sub>s</sub>, como se muestra a continuación, y cuyo valor depende de las condiciones de diseño y no de valores exactos de los parámetros involucrados:

$$V_t = K_s \sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g}} \quad (20)$$

Éste parámetro de diseño, K<sub>s</sub>, es importante tanto para el dimensionamiento de separadores gas-líquido del diámetro de su respectivo extractor de niebla. Éste valor depende de muchos factores, tales como, la presión, las propiedades del fluido, la geometría del separador, el régimen de flujo, el dispositivo de entrada, las cantidades relativas de gas y de líquido, y lo más importante, el tipo de extractor de niebla y su diseño.

A pesar de que los valores de K<sub>s</sub> se basen en los conocimientos empíricos adquiridos y no sea un dato que se calcule en función de otros valores como en el método del Asentamiento de la gota. Varios autores han tratado de estimar, basados en sus propias experiencias e investigaciones, los valores estimados para el factor K<sub>s</sub>, entre éstos el manual API-12J y John M. Campbell. API 12J recomienda un rango de valores de K<sub>s</sub> que son presentados en el cuadro 4.<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> CAMPBELL, J. Gas-Liquid Separators Sizing Parameter. En: Production & Processing Facilities: Tip Of The Month. PetroSkills. Septiembre de 2015. p. 4.

**Cuadro 4. - Rangos para el factor Ks según API 12J.**

Geometría	Altura o Longitud, ft (m)	Rango de Ks, ft/s	Rango de Ks, m/s
Vertical	5 (1.52)	0.12 – 0.24	0.037 – 0.073
	10 (3.05)	0.18 – 0.35	0.055 – 0.107
Horizontal	10 (3.05)	0.40 – 0.50	0.122 – 0.152
	Otras	$0.40 - 0.50(L/10)^{0.56}$	$0.122 - 0.152(L/3.05)^{0.56}$

**Nota: CAMPBELL, J. Gas-Liquid Separators Sizing Parameter. En: Production & Processing Facilities: Tip Of The Month. PetroSkills. Septiembre de 2015. p. 4.**

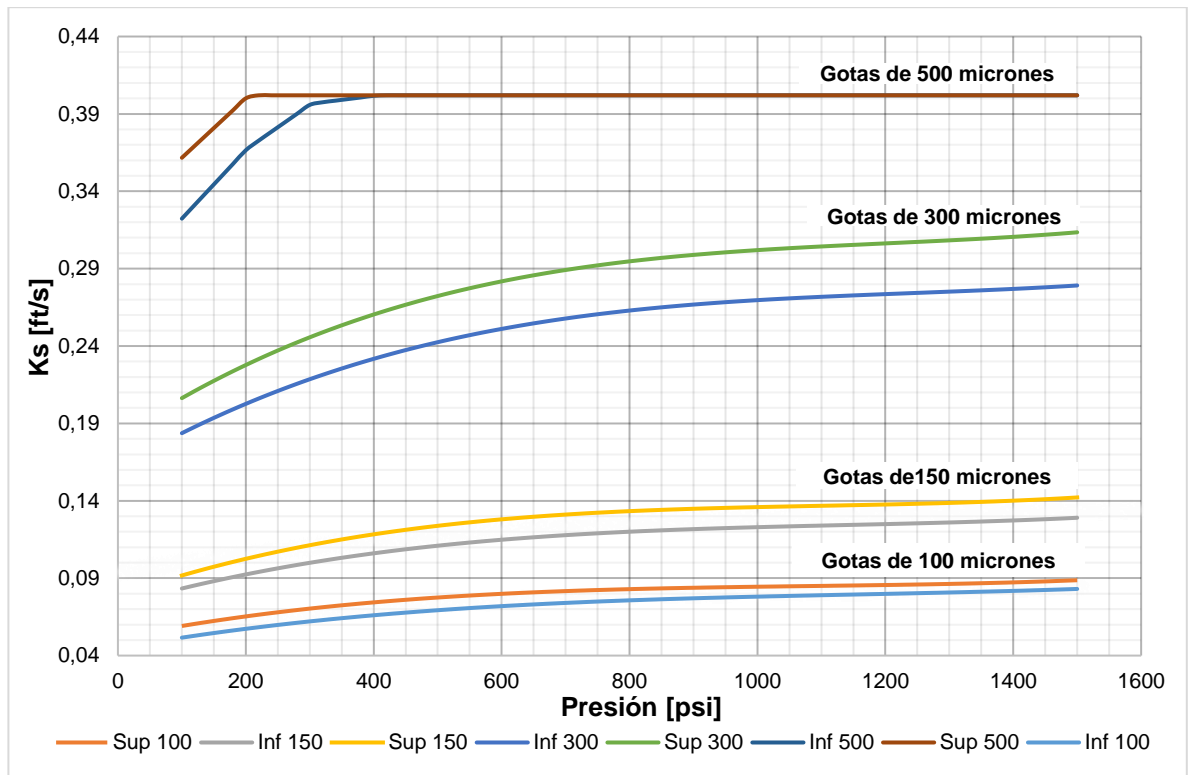
Para API 12J, el máximo valor permitible para la velocidad superficial, calculado con los valores mostrados en la tabla 4, es aplicable sólo para separadores que tienen un extractor de niebla tipo malla.

John Campbell en el capítulo 11, volumen 2 del libro Gas Conditioning and Processing, para separadores verticales presenta el valor de Ks en función de la presión y el tamaño de la gota de líquido. Ésta dependencia de Ks es mostrada en la figura 8. Es de notar que para cada tamaño de gota existe un rango de Ks.

Para separadores horizontales, el dimensionamiento depende, entre otras, de la longitud efectiva y del nivel de líquido (altura disponible para el flujo de gas, hg). En la figura 6 del numeral anterior, se puede observar un esquema de un separador horizontal, de donde se puede interpretar cuál es la altura para el flujo de gas, hg, y la longitud efectiva, Le. El factor Ks para separadores horizontales (Ksh), se puede hallar conociendo además de las dos variables ya mencionadas, el factor Ks para separadores verticales, Ksv, hallado en la gráfica anterior mediante la siguiente ecuación:

$$K_{SH} = K_{SV} \left[ \frac{(L_e/D)}{(h_g/D)} \right] \quad (21)$$

**Gráfico 3. Factor Ks en función de la presión y tamaño de gota de líquido para separadores verticales (Ksv).**



Si el valor encontrado de  $K_{SH}$  mediante la ecuación anterior es mayor que el valor máximo permitido de 0.7ft/s (0.21m/s), entonces  $K_{SH}$  tomará el valor máximo.

Las curvas mostradas en el gráfico 3 son polinomios de tercer orden para tamaños entre 100 y 300micrones, y su ecuación es la mostrada a continuación (22). El valor de sus coeficientes (a, b, c y d) son mostrados en el cuadro 5.

$$K_{SH} = a + bP + cP^2 + dP^3 \quad (22)$$

**Cuadro 5. - Valor de los coeficientes para las ecuaciones polinómicas.**

Coeficient e	Tamaño de las gotas, micrones					
	Inf 100 $\mu$	Sup 100 $\mu$	Inf 150 $\mu$	Sup 150 $\mu$	Inf 300 $\mu$	Sup 300 $\mu$
a	0.044882	0.051678	0.072564	0.78829	0.161458	0.18108
b	7.24E-05	8.13E-05	0.000117	0.000141	0.00024	0.000273
c	-5.5E-08	-7E-08	-9.4E-08	-1.2E-07	-1.8E-07	-2.1E-07
d	1.58E-11	2.15E-11	2.74E-11	3.61E-11	4.82E-11	5.79E-11

**Fuente: CAMPBELL, J. Gas-Liquid Separators Sizing Parameter. En: Production & Processing Facilities: Tip Of The Month. PetroSkills. Septiembre de 2015, p. 7.**

Una tercera opción de obtener el valor del factor Ks, es mediante la escogencia del extractor de niebla. Cada fabricante de dichos extractores, mediante sus propios estudios de laboratorio, han obtenido los valores en los que mejor se comporta cada extractor, pero éste tema se verá a continuación con más amplitud.

La ecuación de Souders-Brown ha sido utilizada puesto que esta puede dar resultados razonables a través de cálculos sencillos, pero tiene varios altercados en términos de cuantificación del comportamiento de un separador.

El método de Souders-Brown es limitado ya que es basa sus cálculos en un tamaño promedio de gota en el fluido, pero no puede cuantificar la cantidad de gotas presentes en la sección de asentamiento del gas.

**2.3.4. Extractor de niebla.** Es el dispositivo final de tratamiento del gas en un separador convencional y su propósito principal es remover las gotas de líquido remanentes a la salida de la sección de asentamiento del gas. De este depende la cantidad de líquido que lleva el gas aguas abajo. La capacidad del extractor de niebla depende de la velocidad del gas.

Los extractores tipo malla son los más usados en el diseño de separadores verticales. Los alambres utilizan un mecanismo de separación llamado impregnación de líquido seguido por la coalescencia de las gotas lo suficientemente grande para desprenderse de los alambres y descender a la sección de recolección de líquido.

Los extractores de paquetes de aspas, capturan gotas por impacto inercial. El Angulo de las aspas fuerza al gas a cambiar de dirección mientras que las gotas de líquido de mayor densidad tienden a viajar en dirección vertical. Su selección y diseño determinará la cantidad de líquido remanente en la fase de gas libre.

La eficiencia y rendimiento del extractor de niebla depende de varios factores:

- Eficiencia en la remoción: La eficiencia de remoción requerida y la cantidad tolerable de gotas atrapadas en la fase gaseosa están determinadas por la sensibilidad y requerimientos aguas abajo del separador.
- Capacidad de gas: La capacidad de gas se determina usualmente por la máxima velocidad permitida justo antes de que el reingreso de líquido a la fase gaseosa sea excesivo. Cada extractor de niebla tiene su respectivo valor de  $K_S$ ,

el cual por lo general es diferente a los valores usados para diseñar la sección de asentamiento de gas, aunque la mayoría de la información acerca de la capacidad de los extractores de nieblas está basado en pruebas a baja presión de aire o agua lo cual no se puede extrapolar a las condiciones reales.

- Manejo de líquido: Se refiere a la cantidad de líquido dentro de la fase gaseosa (gal/min/ft<sup>2</sup>) que el extractor de niebla puede tratar antes que la eficiencia de separación caiga sustancialmente.

La capacidad de la mayoría de los extractores de niebla declina con el incremento de la presión. Bothamley y Campbell (2013)<sup>9</sup> creen que este comportamiento se debe a la relación del incremento de la relación entre la densidad del gas y la densidad del líquido ( $\rho_g/\rho_l$ ) y a la disminución de la tensión superficial del líquido el cual ocurre con el incremento de la presión.

Los extractores de tipo malla y de tipo aspas, utilizan el mecanismo primario que usa este tipo de extractor es el impacto inercial. Los cuadros 6, 7 y 8 muestran parámetros de construcción y de diseño, incluyendo valores del factor  $K_S$  para distintos extractores de niebla.

---

<sup>9</sup> BOTHAMLEY. Part II. Op. cit., p. 42.

**Cuadro 6. - Parámetros de diseño para un Extractor Tipo Malla.**

Tipo	% de Porosidad	Área superficial, ft <sup>2</sup> /ft <sup>3</sup>	Espesor, ft(in)	Ks, ft/s	Máximo HLSD/Di	Altura mínima del espacio de Gas, ft
Estandar	98.6%	65	0.5 (6)	0.3 8	0.75	1.5
Gran Capacidad	98.2%	85	0.5 (6)	0.3 5	0.75	1.5
Alta Eficiencia	97.6%	115	0.5 (6)	0.3 5	0.75	1.5

Fuente: Bothamley y Campbell. Quantifying Separation Performance. Part III. Octubre de 2013, p. 37.

**Cuadro 7. - Parámetros de diseño para un Extractor Tipo Aspas.**

Tipo	Espaciamiento entre Aspas, in	Ángulo, grados	Espesor, ft (in)	Ksv, ft/s (Ksh)	Máximo HLSD/Di	Altura mínima del espacio de Gas, ft
Diseño Simple	0.5 – 1	30 - 60	0.7 (8.4)	0.5 (0.65)	0.65	2
Alta Eficiencia	0.5 - 1	30 - 60	0.7 (8.4)	0.82 – 1.15	0.65	2

Fuente: Bothamley y Campbell. Quantifying Separation Performance. Part III. Octubre de 2013, p. 37.

**Cuadro 8. - Parámetros de diseño para un Extractor Tipo Ciclón.**

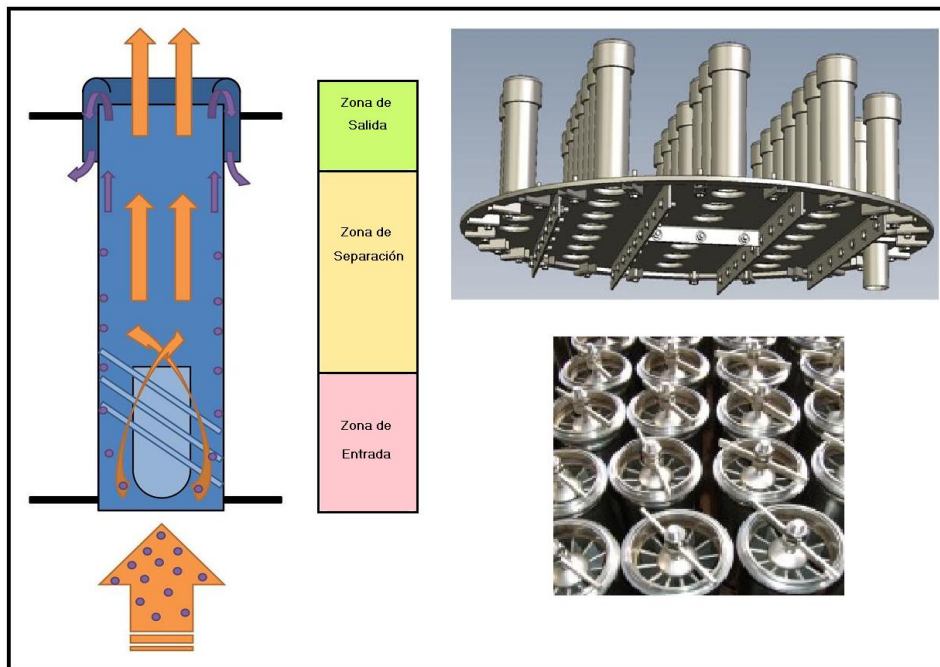
Tipo	Diámetro nominal del ciclón, in	Espacio entre ciclones, in	Longitud, ft (in)	Ks, ft/s	Máximo HLSD/Di	Altura mínima del espacio de gas, FT
2in	2	1.75	0.83 (10)	1.1	0.65	2
3in	3	1.75	1.25 (15)	1.3	0.65	2

Fuente: Bothamley y Campbell. Quantifying Separation Performance. Part III. Octubre de 2013, p. 37.

Bothamley y Campbell (2013)<sup>10</sup> explican que a bajas tasas de flujo, con utilizar un extractor de malla simple sería suficiente, pero éste tiene unas limitaciones en capacidad (valores de  $K_S$ ) comparado con los otros tipos de extractores. Cuando el tipo malla opera por encima de su capacidad actúa como un coalescedor, aumentando el tamaño de las gotas dentro de la fase gaseosa. Estas gotas de mayor tamaño son más fácil de remover utilizando aguas abajo otro extractor, como un tipo aspas o ciclónico (Fig. 6). El tipo malla tiene un buen rendimiento removiendo gotas a bajos caudales, mientras que utilizando como segundo extractor un tipo aspas o ciclónico se aumenta la capacidad del extractor para manejar grandes flujos, además de remover más fácilmente las gotas de mayor tamaño que salen del tipo malla.

<sup>10</sup> Bothamley, M., & Campbell, J. Gas/Liquid Separators: Quantifying Separation Performance Part II. PetroSkills. 43 p.

Fig. 6 - Extractor de Niebla de tipo ciclónico.



Fuente: <http://www.kirkprocess.com/products/services/>

**2.3.5. Sección de recolección de líquido.** Su función depende del tipo de separador y sus aplicaciones, incluyendo lo siguiente:

- Desgasificar el líquido.
- Estabilizar los flujos intermitentes para los equipos y procesos aguas abajo del separador.
- Mantener un sello de líquido en la parte inferior, un requerimiento mínimo para el diseño de la instrumentación y el control de procesos.

Desgasificar el líquido se refiere a o separa el gas libre del líquido para evitar excesos en la cantidad de gas atrapado en la fase líquida, pero presenta ciertas falencias. Por lo general no controla o disminuye el gas acarreado en el líquido, especialmente a altas presiones. No es muy eficiente a bajas temperaturas o con aceites muy viscosos y/o de baja gravedad API.

Así como es difícil calcular la cantidad de líquido dentro de la fase gaseosa, también lo es calcular la cantidad de gas dentro del líquido, por lo que los cálculos son un poco inciertos y no se tiene total certeza del grado de desgasificación.

Por definición, el líquido aguas arriba del separador se encuentra a la presión de burbuja, por tanto, se liberará una cantidad significativa de gas disuelto a medida que el líquido va disminuyendo su presión.

El volumen de ese gas liberado hace ver pequeña la cantidad de gas disuelto dentro del líquido, por esta razón, no se garantiza un buen desempeño del separador de dos fases si se diseña la sección de recolección de líquido para remover gotas pequeñas de gas.

Bothamley y Campbell (2013)<sup>11</sup> afirman que en separadores verticales, modificar el tiempo de retención, variando la altura de líquido tiene un efecto mínimo en aumentar el desempeño en la separación de las burbujas de gas, puesto que la altura no afecta mucho la velocidad del líquido en separadores verticales. Pero por otro lado, variar el diámetro sí afectará la velocidad vertical del líquido, por ende, tendrá un impacto en el desempeño de la separación de burbujas de gas en el líquido. La utilización de platos perforados en la fase líquida normalmente se utiliza

---

<sup>11</sup> BOTHAMLEY. Part II. Op. cit.

para separaciones líquido-líquido. También se hace indispensable el uso de controladores de nivel, ya que este permite de alguna manera controlar el tiempo de retención tanto como para el aceite, como para el agua.

**2.4. Tiempo de retención<sup>12</sup>.** Para asegurarse de que el líquido y el gas alcancen el equilibrio a la presión del separador, se requiere cierto tiempo llamado “tiempo de retención” o el tiempo promedio en el cual la molécula de líquido es retenida, asumiendo flujo. Se define como un promedio del tiempo en el que una molécula de líquido es retenida en el separador bajo flujo tapón.

Este tiempo se define como el volumen de líquido en el separador a ese momento, dividido por la tasa de flujo (Arnold & Stewart, 2008)<sup>13</sup>.

$$t_r = \frac{V}{q_L} \quad (23)$$

Donde,

V = Volumen de líquido almacenado en el separador a ese instante,

$q_L$  = Caudal de líquido a ese instante

Según el manual API-12J, se pueden usar los siguientes tiempos de retención, en función de la gravedad API del crudo para los separadores bifásicos.

---

<sup>12</sup> ARNOLD. Op. cit.

<sup>13</sup> *Ibíd.*

**Cuadro 9. - Tiempos de retención en función de la gravedad API para separadores bifásicos.**

<b>°API</b>	<b>Tiempo de Retención, min</b>
<b>&gt;35°</b>	<b>1</b>
<b>20 – 30°</b>	<b>1 - 2</b>
<b>10-20°</b>	<b>2 - 4</b>

**Fuente: Specification for Oil and Gas Separators (API 12J)**

Cuando se trate de separadores trifásicos, API12J utiliza la siguiente tabla, además de recomendar usar el mismo tiempo de retención tanto para el agua como para el crudo.

**Cuadro 10. - Tiempos de retención en función de la gravedad API para separadores trifásicos.**

<b>°API</b>	<b>Tiempo de Retención (min)</b>
<b>&gt; 35°</b>	<b>3 - 5</b>
<b>&lt; 35°</b>	
<b>&gt; 100°F</b>	<b>5 - 10</b>
<b>80 – 100°F</b>	<b>10 - 20</b>
<b>&lt; 80 ° F</b>	<b>20 - 30</b>

**Fuente: Specification for Oil and Gas Separators (API 12J). 1989**

La experiencia de campo indica que el contenido de aceite en el agua producida para separadores trifásicos diseñados para extraer gotas de agua del aceite está entre unos cuantos cientos y 2000 mg/l. Esta agua requerirá un tratamiento posterior, antes de su disposición.

Separar las gotas de aceite dentro del agua es más fácil que separar las gotas de agua dentro del aceite, debido a que la viscosidad del aceite es alrededor de 5 a 20 veces más grande que la del agua (Arnold & Stewart, 2008)<sup>14</sup>.

Dimensionar el separador para remover la gota de aceite de la fase de agua no suele ser un criterio significativo, por tanto no es necesario que el agua tenga el mismo tiempo de retención que el aceite. A pesar que esta es la recomendación según el manual API 12J, puesto que así se asegura que el separador opere con flujo laminar y por ende una mejor eficiencia de separación, como el principal propósito de un separador trifásico es preparar el aceite para tratamientos posteriores, con sólo cumplir el tiempo de retención recomendado para el aceite, para el agua se pueden usar tiempos entre 50% y 100% del tiempo de retención del aceite, puesto que así se disminuyen costos.

## **2.5. LONGITUD ENTRE COSTURAS Y LONGITUD EFECTIVA.**

Un separador horizontal requiere cierta porción de su longitud total, longitud entre costuras ( $L_{ss}$ ), para distribuir el flujo uniformemente cerca del dispositivo de entrada. El extractor de niebla también utiliza otra porción de la longitud entre costuras.

La longitud del separador entre el dispositivo de entrada y el extractor de niebla se le llama longitud efectiva ( $L_e$ ) la cual distribuye el flujo uniformemente. Se asume que por lo general en un separador horizontal, la longitud ocupada por el dispositivo de entrada y el extractor de niebla es la mitad del diámetro para cada

---

<sup>14</sup> ARNOLD. Op. cit., p. 262.

una, como se observa en la figura 3. Por tanto, la longitud efectiva ( $L_e$ ) queda de la siguiente forma:

$$L_s = L_{DE} + L_e + L_{EN} = 0.5D + 0.5D \quad (24)$$

Entonces,

$$L_s = L_e + D \quad (25)$$

Donde,

$L_s$  = Longitud entre costuras, ft.

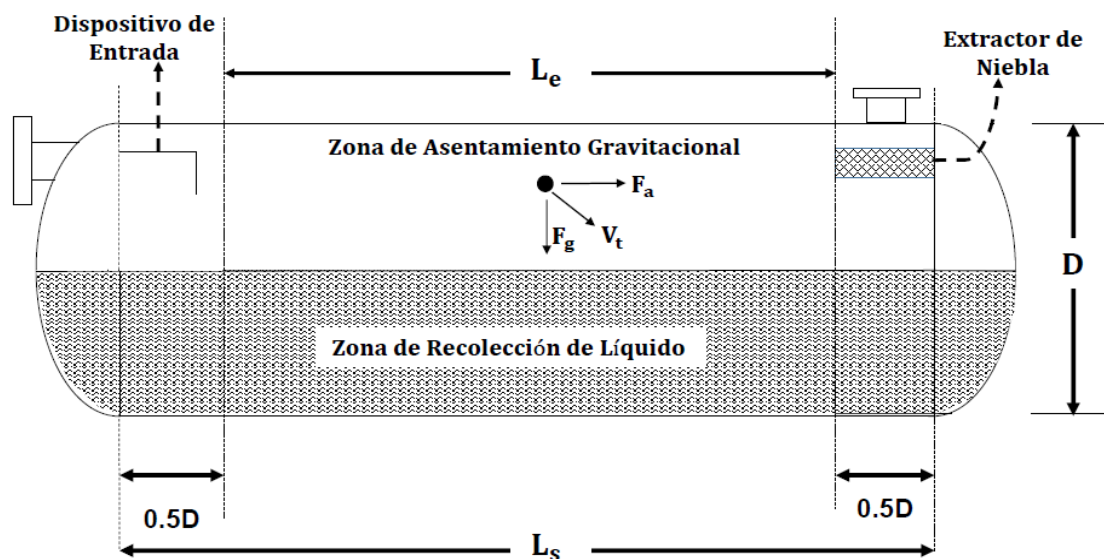
$L_e$  = Longitud efectiva, ft.

$D$  = Diámetro interno del separador.

$L_{DE}$  = Longitud del dispositivo de entrada, ft.

$L_{EN}$  = Longitud del extractor de niebla, ft.

**Gráfico 4. Separador Horizontal Bifásico con las longitudes**



## 2.6.RELACIÓN DE ESBELTEZ.

Para cada separador existe una combinación entre longitud efectiva y su respectivo diámetro, la cual minimiza los costos de dicho separador. Esta relación llamada relación de esbeltez (RE), explica que a menor diámetro, menor será el costo de dicho separador debido a la disminución de su peso. Sin embargo, existe un punto donde disminuyendo el diámetro se incrementa la posibilidad de que el flujo de gas ingrese a altas velocidades y por tanto forme olas y el reingreso de líquidos a la interface gas-líquido.

Para separadores bifásicos, si la capacidad de gas gobierna el diseño y la relación de esbeltez es mayor a 4-5, entonces ocurrirá reingreso de líquido. La mayoría de éstos separadores son diseñados con una relación de esbeltez entre 3 y 4. Se pueden usar relaciones mayores a 4, pero se debe asegurar en el diseño que no habrá reingreso de las gotas de líquido<sup>15</sup>. Experimentalmente se ha visto que la relación de esbeltez óptima para separadores trifásicos está entre 3 y 5. Se pueden usar relaciones mayores a 4, pero se debe asegurar en el diseño que no habrá reingreso de las gotas de líquido<sup>16</sup>.

**Cuadro 11. - Rangos para la Relación de Esbeltez según el tipo de separador**

<b>Tipo de Separador</b>	<b>Rango de R.E.</b>
Bifásico	3 - 4
Trifásico	3 - 5

**Fuente: ARNOLD. Surface Production Operation. Vol 1. 3edición. 2008,**

<sup>15</sup> ARNOLD. Op. cit., p. 117.

<sup>16</sup> *Ibid.*, p. 155.

### 3. MODELOS MATEMÁTICOS

Los modelos matemáticos a continuación representan un diseño planteado en base a la literatura consultada, la información necesaria para suponer valores y proponer procedimientos que lleguen a los mismos resultados, con el fin de cumplir el objetivo de integrar el conocimiento teórico y el conocimiento empírico esquematizado en las diferentes teorías y métodos de solución.

#### 3.1. DIMENSIONAMIENTO DE BOQUILLAS DE ENTRADA Y SALIDA

La boquilla de entrada debe pre acondicionar el flujo para su separación y tanto así como reducir su momentum. Manning (1995)<sup>17</sup> propone que la velocidad erosional debe ser un factor limitante para el diseño. Es por eso que hay diferentes valores en la literatura de la velocidad, aunque todos llegan al acuerdo que depende de la densidad del fluido que pasa a través de estas. Esta velocidad de entrada se puede hallar mediante la siguiente ecuación:

$$V_i = \frac{A}{\sqrt{\rho_m}} \quad (26)$$

Donde,

A = Factor de diseño de las boquillas.

$\rho_m$  = Densidad de la mezcla

---

<sup>17</sup> MANNING y THOMPSON. Oilfield Processing, Vol. 2 Crude Oil. Penwell Corporation. 1995.

**Cuadro 12. - Factor A para los diferentes Dispositivos de Entrada.**

<b>Tipo de Dispositivo</b>	<b>Factor A</b>
Sin dispositivo	26
Plato Dispensor	29
Media Tubería	32
Tipo Aspas	61
Ciclónico	82

**Nota.** Para las boquillas de salida de gas, el factor “A” cambia por el factor “B”, el cual tiene un valor fijo de 60. Para la boquilla de salida de líquido, la velocidad  $V_i$  estará en un rango de entre 3 y 4 ft/s, pero su diámetro mínimo debe ser 2in.

La densidad de la mezcla  $\rho_m$ , se halla mediante la siguiente ecuación.

$$\rho_m = \frac{q_o \rho_o + q_w \rho_w + q_g \rho_g}{q_o + q_g} \quad (27)$$

Donde,

$\rho_m$  = Densidad de la mezcla de fluidos, Lb/ft<sup>3</sup>.

$q_{o,w,g}$  = Caudal de la fase del fluido a condiciones de separador, ft<sup>3</sup>/dia.

$\rho_{o,w,g}$  = Densidad de la fase del fluido a condiciones de separador, Lb/ft<sup>3</sup>.

Al conocer la velocidad de entrada del separador y el caudal total que pasa a través de la boquilla de entrada, se puede calcular el diámetro de la boquilla mediante la siguiente ecuación:

$$d_i = \sqrt{\frac{4(q_o + q_w + q_g)}{\pi V_i}} \quad (28)$$

Donde,

$d_i$  = Diámetro de la boquilla de entrada al separador, ft.

$q_{o,w,g}$  = Caudal de la fase del fluido a condiciones de separador, ft<sup>3</sup>/s.

### 3.2. DISEÑO DE SEPARADORES BIFÁSICOS

El diseño de un separador bifásico está enfocado en extraer la mayor cantidad de condensados presentes en el gas a condiciones de operación del sistema de tratamiento. Pero aun así, la desgasificación del líquido también es un factor igual de importante, ya que este incurre en mediciones erróneas del volumen total de aceite.

**3.2.1. Diseño de un separador bifásico vertical.** Para diseñar un separador bifásico vertical se deben seguir los siguientes pasos:

**PASO 1** Se halla la capacidad del líquido mediante la siguiente ecuación:

$$D^2 h_L = 8.58 t_r (q_o + q_w) = \text{CapLiq} \quad (29)$$

Donde,

$D$  = Diámetro del separador, in.

$h_L$  = Altura del líquido en el separador, in.

$t_r$  = Tiempo de retención para la separación gas-líquido, min.

$q_{o,w}$  = Caudal de la fase del fluido a condiciones de separador, bbl/día.

Para definir el diseño del separador según el rendimiento deseado en la sección de asentamiento gravitacional del gas, se puede calcular el diámetro mínimo en donde el fenómeno de asentamiento usar dos métodos diferentes:

**Teoría de asentamiento de la gota:** En éste método, el diámetro mínimo está definido mediante la siguiente ecuación:

$$D_{\min} = \left\{ 5040 \left[ \frac{TZQ_g}{P} \right] \left[ \left( \frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right) \frac{C_D}{d_m} \right]^{0.5} \right\}^{0.5} \quad (30)$$

Donde,

$Q_g$  = Caudal de gas a condiciones estándar, scf/día.

$T$  = Temperatura del sistema, Rankine.

$Z$  = Factor de compresibilidad del gas.

$P$  = Presión del sistema, psia.

$\rho_{l,g}$  = Densidad de la fase del fluido a condiciones de separador, Lb/ft<sup>3</sup>.

$d_m$  = Diámetro de la gota de líquido que se desea retirar, micrones.

$C_D$  = Coeficiente de arrastre.

El tamaño de la gota de líquido que se desea separar, por lo general el tamaño retirado de la sección de asentamiento gravitacional es aproximadamente 140 micrones como se explicó anteriormente.

El coeficiente de arrastre<sup>18</sup>  $C_D$  se calcula mediante una iteración, suponiendo un valor inicial para el coeficiente de arrastre igual a 0.34 en de velocidad terminal:

$$V_t = \left[ \left( \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \right) \frac{d_m}{C_D} \right]^{0.5} \quad (31)$$

Seguido a esto, reemplazamos el valor de la velocidad terminal en la ecuación del número de Reynolds:

$$Re = 0.0049 \frac{\rho_g d_m V_t}{\mu_g} \quad (32)$$

Finalmente, se reemplaza el valor del número de Reynolds obtenido en la ecuación del coeficiente de arrastre:

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{Re^{0.5}} + 0.34 \quad (33)$$

Donde,

$V_t$  = Velocidad terminal o de asentamiento de la gota, ft/sec.

$Re$  = Numero de Reynolds.

$C_D$  = Coeficiente de arrastre.

$\mu_g$  = Viscosidad del gas, cp.

El valor del coeficiente de arrastre obtenido en la ecuación 34, se reemplaza en la ecuación 32, y así sucesivamente, iterando hasta que converja el valor del coeficiente de arrastre.

---

<sup>18</sup> ARNOLD. Op. cit., p. 201.

**Método de Souders-Brown:** En éste método, el diámetro mínimo está definido mediante la ecuación 30:

$$D_{min} = \left[ \frac{Q_g}{67824V_{gmax}} \left( \frac{P_s}{P} \right) \left( \frac{T}{T_s} \right) (Z) \right]^{0.5} \quad (34)$$

$D_{min}$  = Diámetro mínimo requerido por el gas, in.

$P_s$  = Presión estándar en unidades de campo, psia.

$T_s$  = Temperatura estándar en unidades de campo, Rankine (°R).

$V_{gmax}$  = Velocidad máxima del gas, ft/seg.

Para calcular la velocidad máxima,  $V_{gmax}$ , que es la velocidad máxima que puede alcanzar el gas para que la fuerza de arrastre no supere la fuerza gravitacional, se supone un valor para el factor de Souders-Brown,  $K_{SB}$ , y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V_{gmax} = K_{SB} \sqrt{\left( \frac{\rho_L - \rho_g}{\rho_g} \right)} \quad (35)$$

Donde,

$V_{gmax}$  = Velocidad máxima del gas, ft/seg.

$K_{SB}$  = Parámetro de diseño de Souders-Brown, ft/seg.

**PASO 2** Teniendo la capacidad de líquido y el diámetro mínimo requerido para que la extracción del líquido de sección de gas se efectúe, se prosigue a encontrar los valores de longitud y diámetro del separador que se ajusten a la relación de esbeltez propuesta.

**PASO 3** Para definir la altura del separador se debe conocer la altura de líquido,  $h_L$ , que se haya mediante la siguiente ecuación:

$$h_L = \frac{\text{CapLiq}}{D^2} \quad (36)$$

**PASO 4** Escogiendo un diámetro comercial mayor al diámetro mínimo requerido por el gas hallado con las ecuaciones 24 o 30 (según el método utilizado) y se empieza la búsqueda de la combinación óptima que se ajuste a la relación de esbeltez.

Teniendo la altura de líquido  $h_L$ , se calcula la altura máxima del líquido,  $H_L$ , mediante la siguiente ecuación:

$$H_L = [\text{BTL} - \text{LAL}] + [\text{LSDL} - \text{LAL}] + h_L + [\text{LAH} - \text{LSDH}] \quad (37)$$

Donde,

$H_L$  = Altura máxima del líquido, ft.

$[\text{BTL} - \text{LAL}]$  = Distancia entre el fondo del separador y el nivel de apagado, ft.

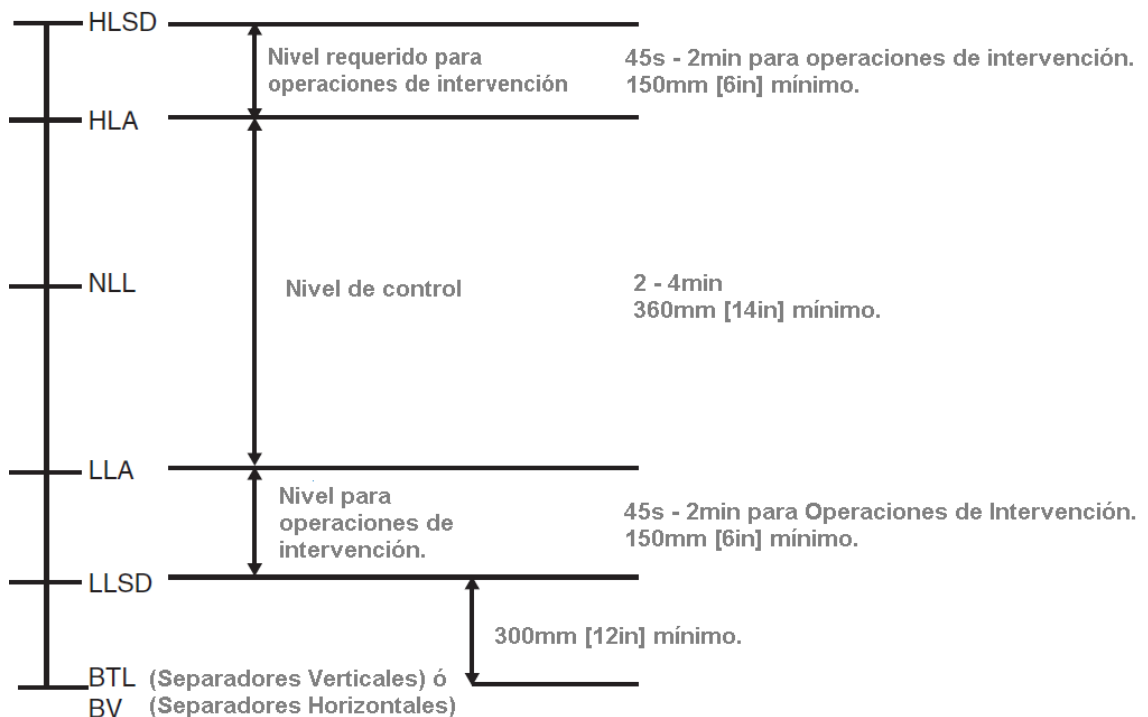
$[\text{LSDL} - \text{LAL}]$  = Distancia entre nivel de apagado y nivel de alarma bajo, ft.

$[\text{LAH} - \text{LSDH}]$  = Distancia entre nivel de apagado y de alto, ft.

Teniendo en cuenta las debidas alturas estandarizadas para el control de seguridad del líquido dentro del separador como se muestra en la figura 10.

Si la altura de líquido ( $h_L$ ) calculada es menor a 14in (1.17ft), se utilizan las 14in como el valor de dicha altura, tal y como se aprecia en la figura 10.

**Fig. 7 - Alturas mínimas y de Seguridad de un Separador.**



**Fuente: Modificado de BOTHAMLEY y Campbell. Quantifying Separation Performance. Octubre de 2013.**

Los tiempos de intervención mostrados en la figura 7 pueden variar, pues dependen de una variedad de factores, tales como los sistemas de control, las disposiciones del Staff de control y el diseño de las facilidades. Tiempos mayores

entre alarmas y el apagado, pueden significar separadores más grandes y costosos.

Se prosigue a calcular la altura total del separador mediante la siguiente ecuación (ver Gráfico 5), teniendo en cuenta las distancias mínimas requeridas por el dispositivo de entrada, la sección de asentamiento gravitacional y el extractor de niebla:

$$H_T = H_L + X_1 + X_2 + X_3 + H_{EN} + H_S \quad (38)$$

Donde,

$X_1$  = Distancia entre el LSDH y al dispersor de entrada, ft.

$X_2$  = Altura del dispersor de entrada, ft.

$X_3$  = Distancia entre el dispersor de entrada y el extractor de niebla, ft.

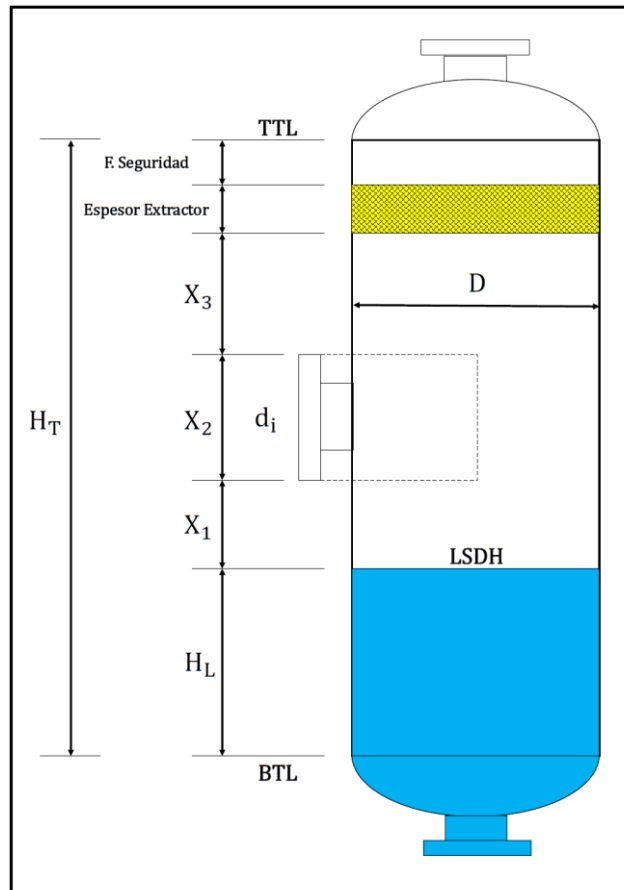
$H_{EN}$  = Espesor o altura del extractor de niebla, ft.

$H_S$  = Altura de seguridad,  $0.15 * D_{min}$ , ft.

Finalmente, se halla la relación de esbeltez, RE, utilizando la ecuación 35. Si el valor de la relación de esbeltez no se encuentra dentro del rango definido, se procede a repetir el **paso 3**, escogiendo otro diámetro comercial mayor al diámetro mínimo hasta encontrar el diámetro ideal que conlleve a un valor de la relación de esbeltez deseado.

$$RE = \frac{12H_L}{D} \quad (39)$$

**Gráfico 5. Alturas para un separador Vertical**



**3.2.2. Diseño de un separador bifásico horizontal.** Para diseñar un separador bifásico horizontal se debe seguir los siguientes pasos.

**PASO 1** Se supone un nivel de llenado de líquido,  $h_D$ , el cuál es la relación de la altura del líquido con respecto al diámetro o altura del separador. En los separadores bifásicos, por lo general se diseña asumiendo un llenado del 50%, el cual conlleva a un mejor desempeño del separador.

Si el llenado es diferente al 50%, se procede a calcular la fracción de área transversal circular generada por el nivel de líquido mediante la siguiente ecuación:

$$M = \frac{1}{\pi} \cos^{-1}(1 - 2h_D) - \frac{2}{\pi} (1 - 2h_D) \sqrt{h_D - h_D^2} \quad (40)$$

Donde,

$M$  = Fracción del área transversal circular ocupada por el líquido.

$h_D = h/D$  = Relación entre la altura del líquido y el diámetro del separador.

El gráfico 6 muestra la relación gráfica entre el llenado ( $h_D$ ) y la fracción ocupada por el líquido.

**PASO 2** Posteriormente se debe hallar la capacidad del líquido mediante la siguiente ecuación:

$$\text{CapLiq} = D^2 L_{eL} = \frac{t_r(q_o + q_w)}{1.4M} \quad (41)$$

Donde,

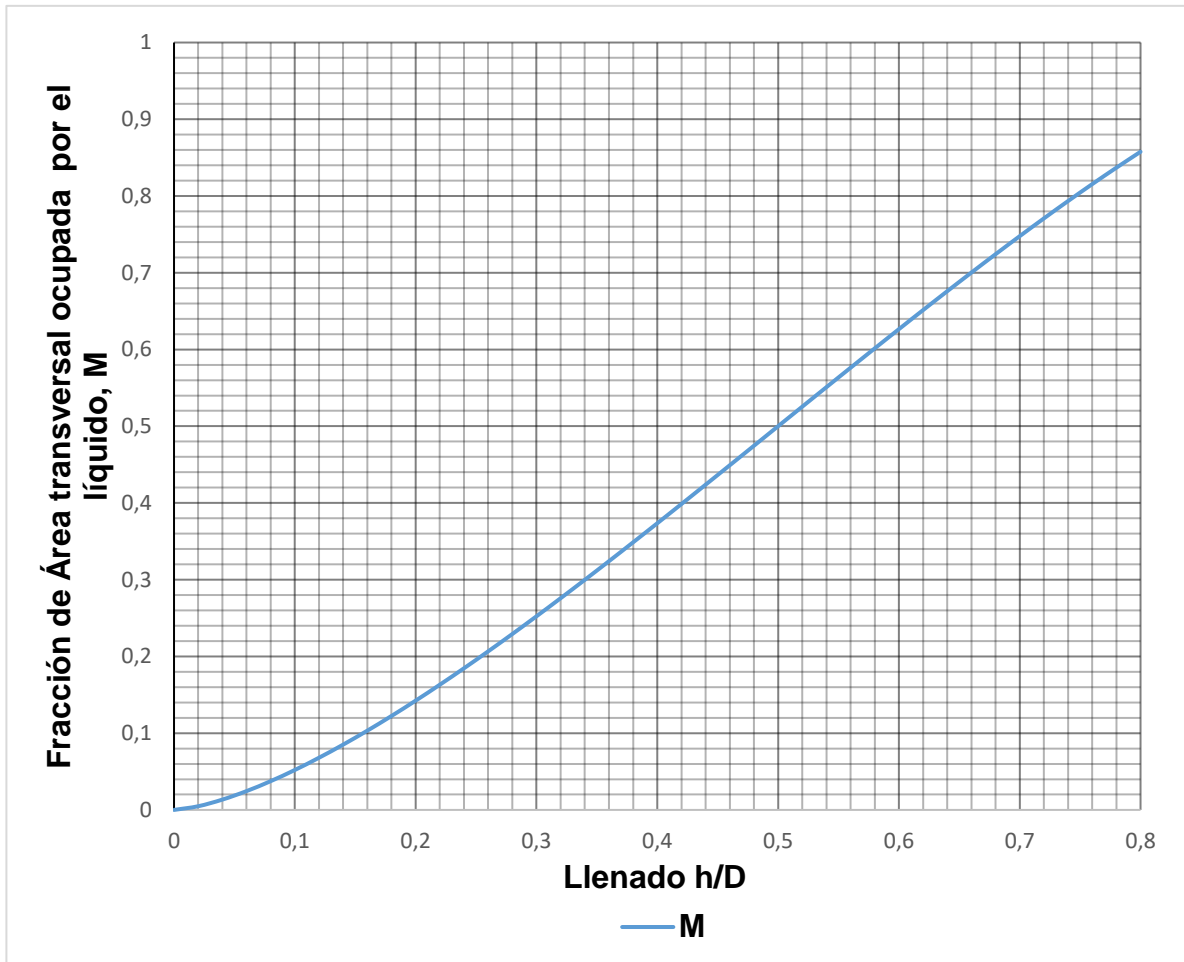
$t_r$  = tiempo de retención del líquido para la separación gas-líquido, min.

$q_{o,w}$  = Caudal de la fase del fluido a condiciones de separador, bbl/día.

$L_{eL}$  = Longitud efectiva para la separación de gas del líquido, ft.

$D$  = Diámetro del separador, in.

**Gráfico 6. Gráfica de Llenado ( $h/D$ ) vs. Fracción de área transversal ocupada por el líquido (M)**



**PASO 3** Para definir el diseño del separador según el rendimiento deseado en la sección de asentamiento gravitacional del gas, se puede usar los métodos de asentamiento de la gota o el de Souders-Brown:

**Teoría de asentamiento de la gota.** Se debe conocer de antemano el tamaño de gota a retirar y el valor del coeficiente de arrastre, los cuales se pueden hallar mediante la iteración de las ecuaciones 27, 28 y 29, anteriormente descritas.

Teniendo estos datos, se puede calcular la capacidad del gas, en el cual se asegura la separación de líquido del gas, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{CapGas} = DL_{eG} = 420 \left( \frac{1 - h_D}{1 - M} \right) \left[ \frac{TZQ_g}{P} \right] \left[ \left( \frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right) \frac{C_D}{d_m} \right]^{0.5} \quad (42)$$

Donde,

$D$  = Diámetro del separador, in.

$L_{eG}$  = Longitud efectiva para la separación de líquido del gas, ft.

$Q_g$  = Caudal de gas a condiciones estándar, scf/día.

$T$  = Temperatura del sistema, Rankine.

$Z$  = Factor de compresibilidad del gas.

$P$  = Presión del sistema, psia.

$\rho_{l,g}$  = Densidad de la fase del fluido a condiciones de separador, Lb/ft<sup>3</sup>.

$M$  = Fracción del área transversal circular ocupada por el líquido, Ec. 24.

$d_m$  = Diámetro de la gota de líquido que se desea retirar, micrones.

$C_D$  = Coeficiente de arrastre.

**SOUDERS-BROWN:** Para separadores horizontales el recorrido de la gota de líquido en la sección de asentamiento gravitación es diferente a la de los separadores verticales ya que está limitado por la longitud del separador, y la altura de gas disponible. Por esta razón se procede a corregir el parámetro  $K_{sb}$  determinado para un separador vertical ( $K_{SBV}$ ) y ajustarlo a un separador horizontal ( $K_{SBH}$ ) mediante la siguiente ecuación:

$$K_{SBH} = K_{SBV} \left[ \frac{RE - 1}{1 - h_D} \right] \quad (43)$$

Donde,

$K_{SBH}$  = Parámetro de Souders-Brown para separadores horizontales, ft/seg.

$K_{SBV}$  = Parámetro de Souders-Brown para separadores verticales, ft/seg

Mediante la ecuación 14, se puede ajustar la capacidad del gas en función del coeficiente de arrastre y del tamaño de la gota en la ecuación 43, y asumiendo que el valor adimensional lleva consigo las variables alternas correspondiente, se tiene la siguiente ecuación.

$$\text{CapGas} = DL_{eG} = 2750 \left( \frac{1}{K_{SBH}} \right) \left( \frac{1 - h_D}{1 - M} \right) \left[ \frac{TZQ_g}{P} \right] \left[ \left( \frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right) \right]^{0.5} \quad (44)$$

Si se comparan las dos capacidades, tanto la de líquido como la de gas, en la mayoría de los casos la longitud efectiva calculada a partir de la capacidad de líquido ( $L_{eL}$ ) es mucho mayor que la calculada a partir de la capacidad de gas ( $L_{eG}$ ). En este caso prima dimensionar el separador en función del líquido, puesto que es el mayor valor, además que al escoger éste (el mayor), se cumplen las longitudes efectivas mínimas para las dos fases.

Este uno de los errores más frecuentes en el dimensionamiento de los separadores horizontales, al no tener en cuenta las condiciones dadas por el gas en el separador. Se propone calcular el diámetro en el cual la longitud efectiva del gas predomina sobre la del líquido.

Si se despeja la longitud efectiva de las ecuaciones 42 y 43 se tiene,

$$L_{eL} = \frac{\text{CapLiq}}{D^2} \quad (45)$$

$$L_{eG} = \frac{\text{CapGas}}{D} \quad (46)$$

Ahora, si se igualan las ecuaciones 46 y 47, se tiene que,

$$\frac{\text{CapLiq}}{D^2} = \frac{\text{CapGas}}{D} \quad (47)$$

Despejando el diámetro, se tiene,

$$D = \frac{\text{CapLiq}}{\text{CapGas}} = D_{\text{ref}} \quad (48)$$

La anterior ecuación arroja un diámetro de referencia ( $D_{\text{ref}}$ ). Para diámetros menores a éste, la longitud efectiva del líquido será mayor a la del gas, y para diámetros mayores, la longitud efectiva del gas será mayor a la de líquido. Esto conlleva a simplificar los cálculos del dimensionamiento cuando se calcule la relación de esbeltez deseada.

**PASO 4** Para hallar la relación de esbeltez, se propone al igual que en el separador vertical, diámetros comerciales de la tabla 13. Con este diámetro se procede a calcular la longitud efectiva  $L_e$  a partir de la ecuación respectiva según el método escogido, y posteriormente, calcular la longitud entre costuras del separador ( $L_s$ ) mediante la siguiente ecuación:

$$L_s = L_e + D \quad (49)$$

En las condiciones en las que la sección de líquido predomina sobre la del gas, el valor de la longitud no debe exceder al valor de la longitud efectiva hallada con la siguiente ecuación:

$$L = \frac{4}{3} L_e \quad (50)$$

**Cuadro 13. - Diámetros Comerciales.**

1	10	36
2	12	42
3	16	48
4	20	60
6	24	72
8	30	78

**Nota.** Tomada de API 12J. Specification for Oil and Gas Separators. 1989.

Finalmente, se calcula la relación de esbeltez y se verifica que se encuentre en el rango determinado, si no cumple se procede a escoger otro diámetro y repetir el paso 4.

### 3.3. DISEÑO DE SEPARADORES TRIFÁSICOS

El diseño de un separador trifásico está enfocado explícitamente al tratamiento del líquido, es decir, a la separación de dos fases líquidas inmiscibles como lo son el

aceite crudo y el agua producida. Aun así, no se puede ignorar totalmente al gas que se encuentra en la mezcla de fluidos, por eso también se debe tener en cuenta la desgasificación de los fluidos líquidos.

**3.3.1. Diseño de un separador trifásico vertical.** Para diseñar un separador trifásico vertical se deben seguir los siguientes pasos:

**PASO 1** Se define los tamaños de gota a separar entre las fases. Por lo general para el asentamiento de las gotas de líquido en la sección de asentamiento gravitacional el tamaño de la gota es de 100 a 140 micrones, para las gotas de agua que se asientan en la fase aceite el tamaño de gota es de 500 micrones, y para las gotas de aceite que ascienden a través de la fase de libre de agua el tamaño es de 200 micrones.

**PASO 2** Calcular el diámetro mínimo del separador para que ocurra el asentamiento de la gota de agua en la fase aceite a fase de agua libre.

$$D_{min} = 6690 \frac{q_o \mu_o}{(\Delta GE) d_{mw}^2} \quad (51)$$

$D_{min}$  = Diámetro mínimo para que ocurra la separación de fases, in.

$q_o$  = Caudal de aceite a condiciones de separador, bbl/día.

$\mu_o$  = Viscosidad dinámica del aceite, cp.

$\Delta GE$  = Diferencia de gravedades específicas entre los fluidos (agua y aceite).

$d_{mw}$  = Diámetro de la gota de agua a separar, micrones.

**PASO 3** Calcular el diámetro mínimo del separador para que ocurra la separación de la gota de aceite que asciende de la fase de agua a la fase de aceite.

$$D_{\min} = 6690 \frac{q_w \mu_w}{(\Delta GE) d_{mo}^2} \quad (52)$$

Donde,

$D_{\min}$  = Diámetro mínimo para que ocurra la separación de fases, in.

$q_w$  = Caudal de agua a condiciones de separador, bbl/día.

$\mu_w$  = Viscosidad dinámica del agua, cp.

$\Delta GE$  = Diferencia de gravedades específicas entre los fluidos (agua y aceite).

$d_{mo}$  = Diámetro de la gota de aceite a separar, micrones.

**PASO 4** El procedimiento para hallar el diámetro mínimo requerido por la sección de asentamiento gravitacional para la separación de líquido de la fase de gas es igual al **PASO 2** del dimensionamiento de un separador bifásico vertical.

**PASO 5** Se escoge el mayor valor entre los diámetros mínimos calculados, al cumplir con el mayor de estos se cumplen los otros diámetros. Se procede a encontrar la combinación de longitud y diámetro de separador que cumpla con el parámetro de relación de esbeltez, utilizando diámetros comerciales utilizados en la industria (tabla 13) mayores al diámetro mínimo.

**PASO 6** Hallar el espesor del líquido en el separador.

$$h_L = h_o + h_w = 8.58 \frac{t_{ro} q_o + t_{rw} q_w}{D^2} \quad (53)$$

Luego se calcula la altura máxima del líquido teniendo en cuenta las debidas alturas estandarizadas para el control de seguridad del líquido dentro del separador (figura 11).

$$H_L = [BTL - LAL] + [LSDL - LAL] + h_L + [LAH - LSDH] \quad (54)$$

Donde,

$H_L$  = Altura total del liquido, ft.

$[BTL - LAL]$  = Distancia entre controladores de nivel, ft.

$[LSDL - LAL]$  = Distancia entre controladores de nivel, ft.

$[LAH - LSDH]$  = Distancia entre controladores de nivel, ft.

Se prosigue a calcular la altura total del separador, teniendo en cuenta las distancias mínimas requeridas por el dispersor de entrada, la sección de asentamiento gravitacional y el extractor de niebla.

$$H_T = H_L + X_1 + X_2 + X_3 + H_{EN} + H_S \quad (55)$$

Donde,

$X_1$  = Distancia entre el LSDH y al dispersor de entrada, ft.

$X_2$  = Altura del dispersor de entrada, ft.

$X_3$  = Distancia entre el dispersor de entrada y el extractor de niebla, ft.

$H_{EN}$  = Espesor o altura del extractor de niebla, ft.

$H_S$  = Altura de seguridad, ft.

Se calcula la relación de esbeltez,

$$RE = \frac{12H_L}{D} \quad (56)$$

Donde,

$RE$  = Relación de esbeltez.

Si el valor de la relación de esbeltez no se encuentra dentro del rango definido, se procede a repetir el proceso hasta encontrar el diámetro ideal que conlleve a un valor de la relación de esbeltez deseado.

### **3.3.2. Diseño de un separador trifásico horizontal.**

Para diseñar un separador trifásico horizontal se debe seguir paso a paso el procedimiento a continuación descrito.

**PASO 1** Este procedimiento es igual al **PASO 1** del dimensionamiento del separador bifásico horizontal.

**PASO 2** Se define el tamaño de gotas a separar tal como en el **PASO 1** del dimensionamiento del separador trifásico vertical.

**PASO 3** Al contrario del dimensionamiento del separador vertical, no se halla un valor mínimo al cual el separador puede operar, al contrario, se procede a

hallar el valor máximo de la altura de aceite, tal que valor mayores no afectarían la eficiencia de separación.

$$(h_o)_{MAX} = \frac{0.00128t_{ro}(\Delta GE)d_{mw}^2}{\mu_o} \quad (57)$$

Donde,

$(h_o)_{MAX}$  = Altura máxima de aceite, in.

$\Delta GE$  = Diferencia de gravedades específicas entre los fluidos (agua y aceite).

$d_{mw}$  = Diámetro de la gota de agua a separar, micrones.

$\mu_o$  = Viscosidad dinámica del aceite, cp.

**PASO 4** Calcular la fracción de área transversal ocupada por el agua:

$$M_w = h_D \frac{q_w t_{rw}}{q_o t_{ro} + q_w t_{rw}} \quad (58)$$

Donde,

$M_w$  = Fracción del área transversal ocupada por el agua.

$h_D = h/D$  = Relación entre la altura del líquido y el diámetro del separador.

$t_{ro,rw}$  = tiempo de retención para la fase del fluido, min.

$q_{o,w}$  = Caudal de la fase del fluido a condiciones de separador, bbl/día.

**PASO 5** Ver fig. 11 y hallar el valor de la relación entre la altura y el diámetro del separador correspondiente a la fase agua, para luego calcular la fracción de la altura correspondiente a la fase aceite.

$$(h_D)_o = h_D - (h_D)_w \quad (59)$$

Donde,

$(h_D)_o$  = fracción de la altura correspondiente a la fase aceite.

$(h_D)_w$  = fracción de la altura correspondiente a la fase agua.

**PASO 6** Se calcula el diámetro máximo correspondiente a la fracción de altura del aceite.

$$D_{MAX} = \frac{(h_o)_{MAX}}{(h_D)_o} \quad (60)$$

Donde,

$D_{MAX}$  = Diámetro máximo en el cual la gota de agua no será mayor, in.

**PASO 7** Se halla la capacidad del líquido.

$$D^2 L l_e = \frac{t_{ro} q_o + t_{rw} q_w}{1.4M} = \text{CapLiq} \quad (61)$$

$t_{ro, rw}$  = tiempo de retención del liquido para la separación gas-liquido.

$q_{o, w}$  = Caudal de la fase del fluido a condiciones de separador, bbl/día.

$L l_e$  = Longitud efectiva para la separación de gas del líquido, ft.

$D$  = Diámetro del separador, in.

**PASO 8** Para definir el diseño del separador según el rendimiento deseado en la sección de asentamiento gravitacional del gas, se sigue el mismo procedimiento del **PASO 3** del dimensionamiento de un separador bifásico horizontal.

**PASO 9** Para hallar la relación de esbeltez, el uso diámetros comerciales (ver tabla 8). Se escoge un diámetro superior al diámetro máximo basado en la fase de aceite, con este diámetro se procede a calcular la longitud efectiva  $L_e$  a partir de la ecuación respectiva. Para separadores el cual su dimensionamiento está basado en la sección de asentamiento gravitacional el cálculo de la longitud entre costuras del separador ( $L_s$ ) se hace mediante la siguiente ecuación

$$L_s = L_e + D \quad (62)$$

**PASO 5** En las condiciones en las que la sección de líquido predomina sobre la del gas, el valor de la longitud no debe exceder al valor de la longitud efectiva hallada con la siguiente ecuación:

$$L = \frac{4}{3} L_e \quad (63)$$

Finalmente, se calcula la relación de esbeltez y se verifica que se encuentre en el rango determinado, si no cumple se procede a escoger otro diámetro y repetir el paso 4.

## **4. DESARROLLO DEL SOFTWARE**

El software creado, llamado HySep, fue desarrollado en Microsoft Visual Studio, y los únicos requerimientos para su instalación es tener la versión 4.5 de .Net Framework. Está diseñado para ser de uso intuitivo, donde no se requiera tener gran conocimiento para utilizarlo y entender los resultados.

La veracidad de las secuencias tanto del diseño como del diagnóstico de los separadores bifásicos y trifásicos bien sean horizontal o vertical respectivamente se determinará, por medio de la comparación de los resultados obtenidos en HySep, con los resultados arrojados por un software comercial reconocido (Aspen Hysys) y utilizando la literatura.

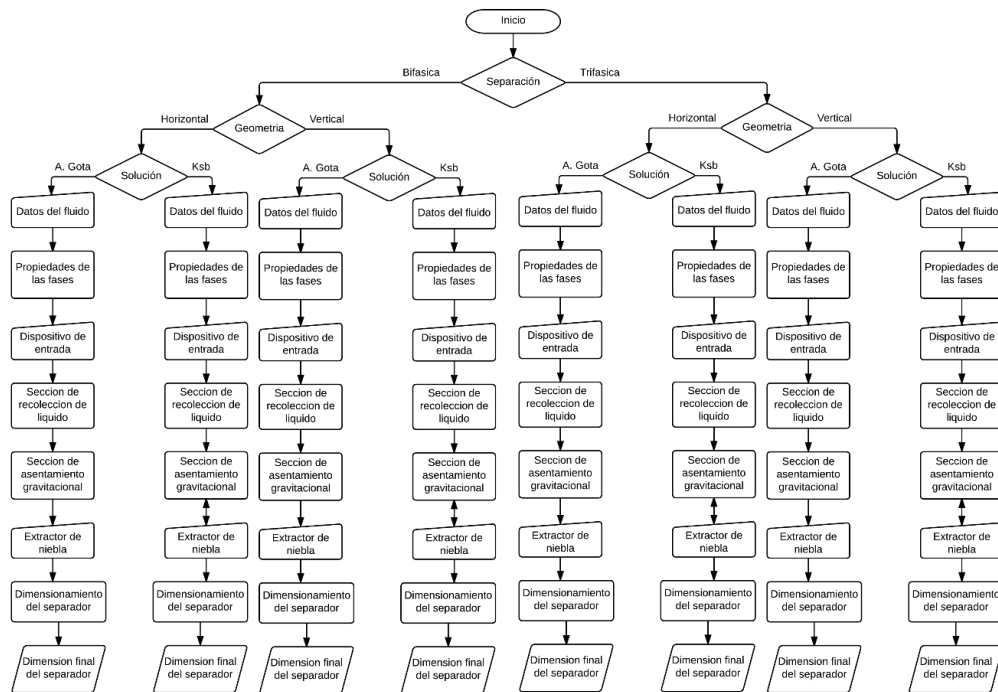
### **4.1. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SOFTWARE**

El diagrama de flujo del software creado en este proyecto se puede apreciar en la figura 14.

### **4.2. GUÍA DE USO**

El software fue diseñado para ser de fácil utilización. Dentro del código están presenten las restricciones a las cuales el programa no se ejecutará para evitar arrojar resultados anormales. Sin embargo, se presenta a continuación una pequeña guía de cómo utilizar el software.

**Gráfico 7. Diagrama de bloques del Software.**



**Paso 1.** Para empezar un diseño nuevo debemos ir al menú “Archivo” ubicado en la ventana principal (esquina superior izquierda) y seleccionar la opción “Nuevo Diseño”.

**Fig. 8 - Captura de la pantalla principal.**



**Fuente: Autor**

**Paso 2.** Posteriormente se abre una nueva ventana donde se selecciona la geometría del separador (Vertical/Horizontal) y el tipo de fluido que ingresará a éste separador (Bifásico/Trifásico).

Dentro de ésta misma ventana, se debe ingresar los datos de temperatura y presión a la cual operará el separador, además de la relación de esbeltez deseada.

**Fig. 9 - Captura de la ventana de datos de entrada.**

Relación de Esbeltez:	
Rangos:	Bifásico 3-4
	Trifásico 3-5

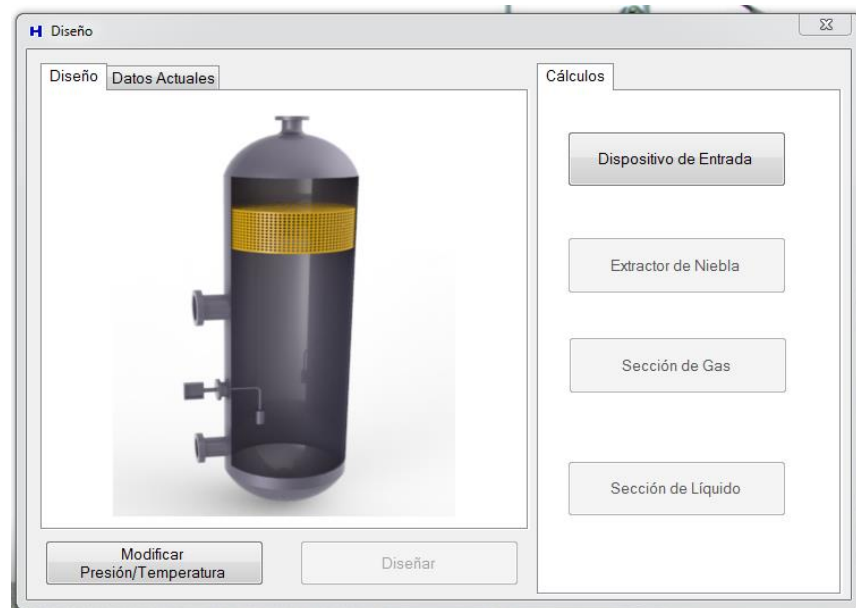
**Fuente: Autor**

El software está diseñado para operar en un rango de temperatura de entre 60°F y 300°F. Igualmente la presión debe estar entre 100psig y 1500psig.

Dentro de ésta ventana, aparecen unos rangos sugeridos para el valor de la relación de esbeltez. El software sólo se ejecuta un rango establecido para bifásicos (3 – 4) y otro para trifásicos (3 – 5).

**Paso 3.** La tercera ventana que se despliega muestra los botones de cada sección del separador a diseñar, tal como la sección del dispositivo de entrada, la sección del extractor de niebla, la sección de asentamiento gravitacional y la sección de recolección de líquido

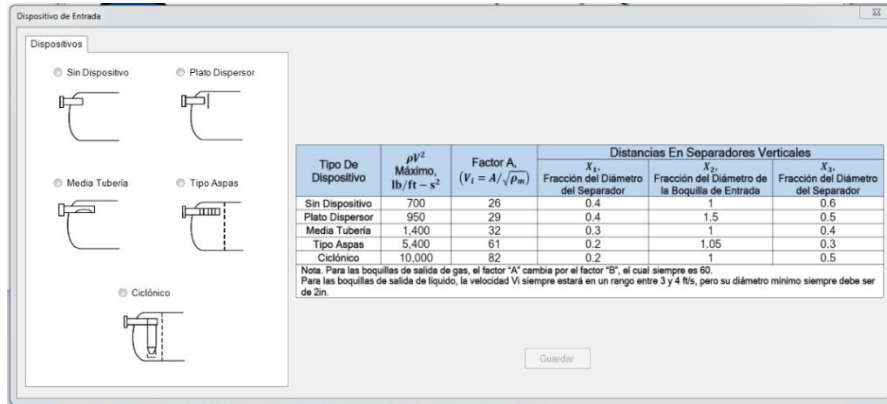
**Fig. 10 - Captura de la ventana de diseño**



**Fuente:** autor

**Paso 4.** Se debe ingresar a cada sección para colocar los datos para el diseño. Para la sección del dispositivo de entrada, donde se debe escoger un dispositivo de los mostrados.

**Fig. 11 - Captura de la ventana de la selección de los dispositivos**

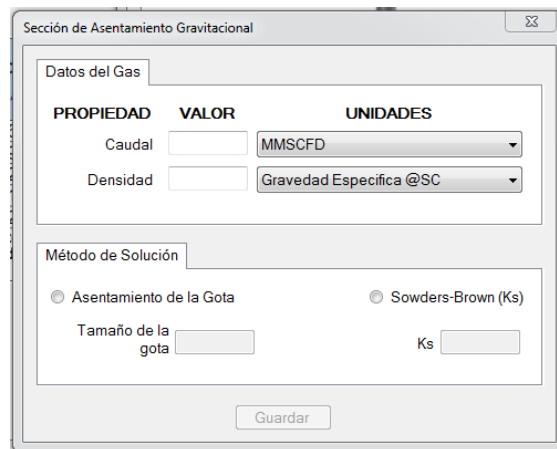


Fuente: Autor.

Así mismo con la sección del extractor de niebla.

**Paso 5.** Para la sección de gas, se debe ingresar el caudal de gas, su densidad, además de seleccionar el método a utilizar para diseñar el separador (Asentamiento de la gota / Souders-Brown).

**Fig. 12 - Captura de la ventana de la sección de gas**



Fuente: Autor.

Para el caudal de gas el software está restringido para trabajar entre 1MMSCFD y 100 MMSCFD. Para la densidad del gas, la gravedad específica debe estar entre 0.55 y 2.

Si se escoge el método de Asentamiento de la gota, el tamaño de gota más pequeño que puede retirar esta sección es de 100micrones, siendo este el valor límite inferior. El software está diseñado para aceptar un tamaño máximo de 500micrones.

Si el método escogido es el de Souders-Brown, el factor Ks debe estar 0.05 y 0.70 ft/s.

**Paso 6.** Para la Sección de Recolección de Líquido, se debe ingresar el caudal de aceite, cuyo rango debe estar entre 100 y 10,000 BOPD. La densidad del aceite debe estar entre 20°API y 40°API. El tiempo de retención se debe escoger de la tabla del manual de diseño API 12J, teniendo en cuenta si es un separador bifásico o bifásico, y dicho tiempo no debe exceder de 20min si es bifásico y si es trifásico no debe exceder de 50min.

**Fig. 13 - Captura de la ventana de la sección de líquido**

The screenshot shows a software window titled "Sección de Recolección de Líquido". It is divided into several sections:

- Datos del Aceite:** A table with columns "VARIABLE", "VALOR", and "UNIDADES". It includes input fields for "Caudal de Aceite" (with a dropdown for "BOPD"), "Densidad" (with a dropdown for "API"), and "Tiempo de Retención" (with a dropdown for "minutos").
- Datos del Agua:** A section with a checkbox and input fields for "Caudal de Agua" and "Densidad".
- Lenado de Líquido:** An input field and a "Guardar" button.
- Table:** A table with two columns: "°API" and "Tiempo de Retención (min)".
 

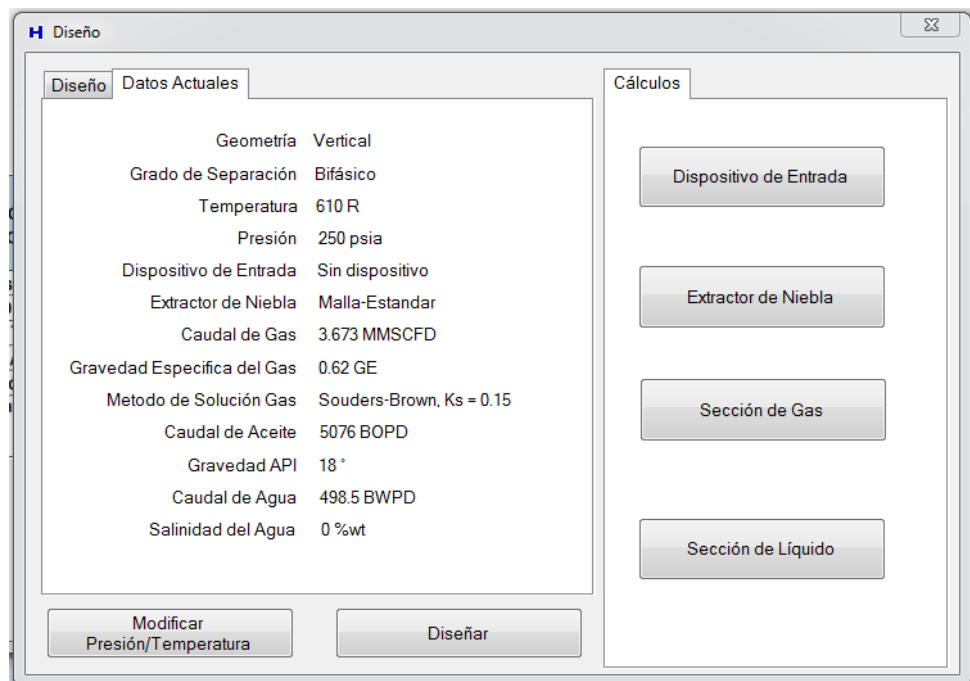
°API	Tiempo de Retención (min)
> 35	0.5 - 1
25 - 30	2
20-25	3
< 20	4 +
- Nota:** A text box containing the following text: "Nota. Si hay presencia de espuma, se debe incrementar el tiempo de retención en un factor de 2 a 4. Si existe alto contenido de CO<sub>2</sub>, se debe usar un tiempo mínimo de 5 min."

**Fuente: Autor.**

Si se tienen los datos del agua, tales como caudal y densidad o salinidad, se debe activar la casilla “Datos del Agua”.

**Paso 7.** Por último, si todos los datos ingresados son correctos, el botón diseñar estará activado para iniciar los respectivos cálculos del diseño.

**Fig. 14 - Captura de la ventana de la ventana diseñar con los datos validados**



**Fuente: Autor.**

**Paso 8.** Los resultados son impresos en otra ventana, donde se muestra los datos del diseño del separador, tales como su diámetro, longitud entre costuras y relación de esbeltez, la cual se ajusta al valor ingresado en la ventana de los datos iniciales.

**Fig. 15 - Captura de la ventana de los datos del diseño del separador**

Propiedad	Valor	Unidades
Diametro del separador	3.92	ft
Relacion de Esbeltez	4.02	-
Altura total de liquido	10.92	ft
Altura total del separador	15.75	ft
Diametro tuberia de entrada	4.87	in
Diametro tuberia de salida del gas	2.71	in
Diametro tuberia de salida liquido	4.13	in

**Fuente: Autor.**

Además de estos datos, HySep arroja los valores de las propiedades calculadas necesarias para el diseño, tales como temperatura y presión pseudoreducidas, necesarias para hallar el factor Z, el cual también es impreso.

**Fig. 16 - Captura de la ventana de la pestaña de las propiedades del fluido calculadas**

Propiedad	Valor	Unidades
Temperatura Critica	357.51	°R
Presión Critica	674.00	psia
Factor Z	0.98	ADIM
Peso Molecular del gas	17.98	Lb/Lbmol
Densidad del Gas	0.70	lb/ft3
Densidad del Aceite	44.19	lb/ft3
Viscosidad del Gas	0.01	cP
RS	20.11	scf/STB
Factor volumétrico de formación Bo	1.34	Bbl/STB
Viscosidad del Aceite	1.34	cP

**Fuente: Autor.**

### 4.3. VALIDACIÓN DEL SOFTWARE

Para la validación de los datos se utilizó un software comercial reconocido. Dicho software, Aspen Hysys, requiere de un Assay para poder ejecutarlo. En este caso se usó el del Campo Rubiales, mostrado en la siguiente tabla.

Con estos datos, se procedió a crear los casos ejemplo. Se validaron los datos del software, variando la presión y temperatura, dejando constante los demás datos de entrada. Los datos de entrada se encuentran en el cuadro 14.

**Cuadro 14. - Datos de Entrada para el diseño (Validación).**

VARIABLE	VALOR	UNIDADES
Presión	250	psig
Temperatura	150	°F
Caudal de Gas	3.673	MMSCFD
G.E. del Gas	0.62	-
Caudal de Aceite	5076	BOPD
°API	18	
Caudal de Agua	498.5	BWPD
G.E. del Agua	1	-
Factor Ks	0.17	ft/s
Espesor del Extractor de Niebla	6	ft

**NOTA. No se utilizó dispositivo de entrada**

**El Extractor de Niebla utilizado fue malla estándar**

Los resultados obtenidos por cada software son mostrados en las siguientes tablas.

**Cuadro 15. - Resultados del Diseño para un Separador Bifásico Vertical (Validación).**

<b>VARIABLE</b>	<b>HYSYS</b>	<b>HYSEP</b>
Diámetro (ft)	3.5	3.92
Longitud entre Costuras (ft)	15.75	15.74
Altura de Líquido (ft)	9.55	10.92
Relación de Esbeltez	4.00	4.02
Tiempo de Retención (min)	4	4
Factor Ks (ft/s)	0.14	0.14

Fuente: Autor.

**Cuadro 16. - Resultados del Diseño para un Separador Bifásico Horizontal (Validación).**

<b>VARIABLE</b>	<b>HYSYS</b>	<b>HYSEP</b>
Diámetro (ft)	9	9
Longitud entre Costuras (ft)	40.5	36
Longitud Efectiva (ft)	31.5	27
Relación de Esbeltez	4.00	4.00
Tiempo de Retención (min)	4	4
Factor Ks (ft/s)	0.17	0.17

Fuente: Autor.

**Cuadro 17. - Resultados del Diseño para un Separador Trifásico Vertical (Validación).**

<b>VARIABLE</b>	<b>HYSYS</b>	<b>HYSEP</b>
Diámetro (ft)	4.5	4.67
Longitud entre Costuras (ft)	24.75	23.5
Altura de líquido (ft)	17.75	17.93
Relación de Esbeltez	5	5.03
Tiempo de Retención del aceite (min)	12	12
Tiempo de Retención del agua (min)	10	10
Factor Ks (ft/s)	0.15	0.15

Fuente: Autor.

**Cuadro 18. - Resultados del Diseño para un Separador Trifásico Horizontal (Validación).**

<b>VARIABLE</b>	<b>HYSYS</b>	<b>HYSEP</b>
Diámetro (ft)	6.42	6.42
Longitud entre Costuras (ft)	35.31	32
Longitud Efectiva (ft)	28.89	25.85
Relación de Esbeltez	5	5
Tiempo de Retención del aceite (min)	12	12
Tiempo de Retención del agua (min)	10	10
Factor Ks (ft/s)	0.19	0.19

Fuente: Autor.

Como se puede aclarar en los resultados, arroja valores muy similares a los del programa comercial muy reconocido, pero se diferencian en que la obtención de éstos por parte del Software creado (HYSEP) es más fácil puesto que es un software didáctico y de fácil uso.

## 5. CONCLUSIONES

- El desarrollo del software logro cumplir con las exigencias impuestas por la complejidad de un diseño moderno para separadores multifásico, debido a la integración de un método teórico de dimensionamiento (Teoría de asentamiento de la gota) con uno empírico (Método de Souders-Brown).
- Se comprobó que los resultados del procedimiento del diseño moderno propuesto tienen validez, al compararlo con uno expuesto en la literatura.
- Al plantear un caso ejemplo de un fluido multifásico, se verificó la veracidad de los resultados obtenidos por el software comparándolo con el desempeño de un software comercial.
- El lenguaje de programación Visual Basic orientado a objetos, fue el que mejor se acomodó a los requerimientos gráficos y al enfoque didáctico que se quería plasmar en el software, puesto permitía crear una interfaz amigable, completa y que permita la integración con otros softwares.
- El programa fue diseñado para tener una interfaz de fácil uso, sin embargo, el usuario debe tener conocimientos previos respecto al diseño de un separador para su correcta utilización y análisis de resultados, los cuales son expuestos en el presente libro.

## 6. RECOMENDACIONES

- Realizar una mayor caracterización de los dispositivos de entrada y el extractor de niebla, y su impacto en el dimensionamiento de un separador multifásico.
- Integrar dispositivos internos de distinta naturaleza usados en la industria, al diseño moderno propuesto.
- Disponer del uso del diseño moderno propuesto para el desarrollo de un software de simulación que permita el análisis de los fluidos resultantes del tratamiento realizado por un separador multifásico, además de poder optimizar diseños ya propuestos.
- Optimizar la escogencia del parámetro de diseño  $K_s$  involucrado en el dimensionamiento de la sección de asentamiento gravitacional del método Souders-Brown, ya que se encuentra demasiado sujeta a las diferentes perspectivas que el dimensionamiento pueda tener.

## BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Specification for Oil and Gas Separators. API-12J, Washington D.C., 1989.

KENT, Arnold.. Surface Production Operations. Tercera Edición. Houston, Texas. Gulf Publishing Company, 2008, Vol 1.

BOTHAMLEY, M. Quantifying Separation Performance. *Gas/Liquid Separators*. 2013, part. 1.

BOTHAMLEY, M. Quantifying Separation Performance. *Gas/Liquid Separators*. 2013, part. 2.

BOTHAMLEY, M. Quantifying Separation Performance. *Gas/Liquid Separators*. 2013, part. 3.

MOSHFEGHIAN, M. Gas-Liquid Separators Sizing Parameter. *Production & Processing Facilities tip of the month PetroSkills*. 2015.

GAMBOA, Diego y PEÑA, Yuly. Determinación de estándares operativos para separadores. Trabajo de Grado Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos, 2007.

KATAOKA, y MISHIMA, K. Generation and Size Distribution of Droplets in Gas-Liquid Annular Two-Phase Flow. En: ASME Journal of Fluids Engineering. Segunda Edición. 1983. 230-238 p.

MANNING, Francis y THOMPSON, Richard. Oilfield Processing. Crude Oil. Tulsa. Penwell Corporation, Vol 2.

VANEGAS, Alfonso y VERA, Gerardo. Diseño de sistemas de separación y tratamiento en la producción de crudo. Trabajo de Grado Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos, 1988.