



Universidad  
Industrial de  
Santander

DESARROLLO DE UNA METODOLOGIA ESTADISTICA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE SEPARACION  
LIQUIDO-LIQUIDO (ACEITE - AGUA) APLICADA A CRUDOS PESADOS

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGIA ESTADISTICA PARA EL DISEÑO  
DE SISTEMAS DE SEPARACION LIQUIDO-LIQUIDO (ACEITE - AGUA)  
APLICADA A CRUDOS PESADOS**

**FERNANDO ENRIQUE MARTINEZ ALBA  
WILMAR ARIEL MORENO TRUJILLO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FALCULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS  
BUCARAMANGA**

**2011**

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGIA ESTADISTICA PARA EL DISEÑO  
DE SISTEMAS DE SEPARACION LIQUIDO-LIQUIDO (ACEITE - AGUA)  
APLICADA A CRUDOS PESADOS**

**FERNANDO ENRIQUE MARTINEZ ALBA  
WILMAR ARIEL MORENO TRUJILLO**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de  
ingeniería de petróleos**

**Director  
JULIO CESAR PÉREZ ANGULO**

**Ingeniero de petróleos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FALCULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS  
BUCARAMANGA**

**2011**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresamos nuestros agradecimientos:

Ingeniero Julio Pérez por su colaboración incondicional, aportando sus conocimientos y orientaciones en este proyecto, igualmente agradecemos al ingeniero Flaminio Guarín por darnos toda la información requerida para la elaboración del proyecto y por su tiempo y orientaciones además de contribuir enormemente en la elaboración del proyecto.

Al ingeniero Oscar Venegas por su aporte en la parte estadística del proyecto fundamentando todos los conceptos requeridos por el mismo.

## DEDICATORIA

DEDICO DE TODO CORAZON ESTE PROYECTO A MI MADRE QUERIDA QUE ESTA EN EL CIELO ALENTANDO TODAS LAS COSAS QUE HAGO CON EL FIN DE QUE SALGAN DE LA MEJOR MANERA EVITANDO QUE MI ALMA SE FRUSTE. ``GRACIAS MADRE QUE ESTAS CUIDANDOME COMO UN ANGELITO...TE AMO.

A MIS HERMANOS LOS CUALES QUIERO MUCHO, TAMBIEN QUIERO DEDICARLES ESTE PROYECTO PORQUE ELLOS FUERON UN APOYO GRANDE PARA QUE ESTO SE HICIERA REALIDAD

A MI PADRE QUE SIEMPRE ESTUVO AHÍ DE ALGUNA FORMA APOYANDO MIS PASOS EN ESTE DURO CAMINAR EN EL ESTUDIO.

A TODOS A MIS AMIGOS QUE ESTUVIERON APOYANDO TODAS LAS COSAS QUE HICE PORQUE ELLOS FUERON LOS QUE ALEGRARON MIS RATOS TRISTES Y ESTUVIERON AHÍ PARA TENDERME LA MANO CUANDO MAS LO NECESITE.

A LA MUSICA AGRADEZCO TODO LO QUE HIZO POR MI PORQUE CON ELLA PUDE SACAR FUERZAS DE FLAQUEZA Y PUDE AFRONTAR TODOS LOS GASTOS QUE ESTE CARRERA REQUIERE.

A RACHELL QUE ESTUVO AHÍ PARA QUERERME Y APOYARME EN TODO. GRACIAS POR QUE VIVIMOS MUCHAS COSAS BUENAS. QUE DIOS TE BENDIGA.

A DIOS QUE SIEMPRE ME DIO LA SABIDURIA PARA HACER LAS COSAS DE LA MEJOR MANERA.

**Fernando Enrique Martínez Alba**

**GRACIAS**

## CONTENIDO

	<b>Págs.</b>
<b>INTRODUCCION</b>	<b>18</b>
<b>1. EMULSIONES</b>	<b>20</b>
1.1 CLASIFICACION DE UNA EMULSION	21
1.1.1 Según las fases de la emulsión	21
1.1.1.1 Emulsión directa	22
1.1.1.2 Emulsión inversa	22
1.1.2 Según la facilidad para romper la emulsión	23
1.1.2.1 Emulsiones flojas	23
1.1.2.2 Emulsiones apretadas	23
1.1.3 Según su estabilidad	23
1.1.3.1 Emulsión inestable	24
1.1.3.2 Emulsión estable	24
1.1.4 Agentes que permiten que la emulsión sea estable	24
1.1.4.1 Tensión interfacial	25
1.1.4.2 Surfactantes o Emulsionantes	28
1.1.4.3 Agentes tensioactivos como emulsificantes	29
1.1.4.4 Clases de agentes tensioactivos	29
1.1.4.5 Signo de la emulsion tensioactivo	30
1.1.4.6 Fuerzas de atracción de van der waals	30
1.2 PARÁMETROS QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE UNA EMULSIÓN	31
1.2.1 Relación de los volúmenes de las fases	31
1.2.2 Distribución del tamaño de gota	31
1.2.3 Temperatura	31
1.3 PARÁMETROS ESPECÍFICOS DE LA INTERFASE AGUA-ACEITE	31
1.4 PARÁMETROS ESPECÍFICOS DE LAS CONDICIONES DE LA EMULSIÓN	32
1.5 CARACTERÍSTICAS DE LAS EMULSIONES	32
1.5.1 Tamaño de gota	32

1.5.2 Resistencia de la película	33
1.5.3 Porcentaje de agua	33
1.5.4 Densidad diferencia	33
1.5.5 Viscosidad de la fase continua	33
<b>1.6 PROCESOS QUE PERMITAN LA SEPARACION DE FASES DE UNA EMULSION</b>	<b>34</b>
1.6.1 Coalescencia de la fase interna	34
1.6.2 Creaming	34
1.6.3 Floculación	35
1.6.4 Agregación	36
<b>1.7 PREVENCIÓN DE EMULSIONES</b>	<b>37</b>
<b>2. METODOS DE MEDICION DEL TAMAÑO DE PARTICULA EN LA EMULSION</b>	<b>38</b>
2.1 DESCRIPCION DE FORMA Y TAMAÑO DE PARTICULA	38
2.2 EFECTOS DEL TAMAÑO DE LA PARTICULA DE AGUA DE LA FASE DISPERSA	39
2.3 FACTORES QUE INCIDEN EN LAS PARTICULAS DE AGUA	39
2.3.1 Tensión interfacial	39
2.4 METODOS DE MEDICION DE TAMAÑO DE PARTICULA DE AGUA	40
2.4.1 Microscopia y análisis de imágenes	40
2.4.2 Difracción de luz laser	41
2.4.3 Cortadores de orificio	43
2.4.4 Sedimentación	44
2.4.5 Centrifugación	46
2.5 INCIDENCIA DEL NUMERO DE REYNOLDS EN LAS EMULSIONES	49
<b>3. METODOLOGIA ESTADISTICA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE SEPARACION (LIQUIDO-LIQUIDO)</b>	<b>51</b>
3.1 DIAGRAMA DE FLUJO	51

3.2 TOMA DE MUESTRA DE EMULSION	54
3.3 MEDIR PROPIEDADES DE LA EMULSION	54
3.3.1 Gravedad API y gravedad especifica del aceite	54
3.3.2 Porcentaje total de BSW de la emulsión	56
3.3.3 viscosidad	57
3.4 PROCEDIMIENTO EN LABORATORIO	59
3.5 EQUIPO DE CENTRIFUGACION	60
3.5.1 Procedimiento básico en equipo de centrifugación	60
3.6 LEY DE STOKES	62
3.6.1 Varias conclusiones para usar la ley de Stokes	62
3.7 CALCULOS EN EXCEL	63
3.8 AJUSTE ESTADISTICO	66
3.9 MANEJO E INTERPRETACION DE SOFTWARE (CRYSTAL BALL)	67
3.10 DISEÑO DE UN SEPARADOR BIFASICO	69
3.10.1 Procedimiento de dimensionamiento de un separador	71
<b>4. APLICACIÓN Y RESULTADOS DE LA METODOLOGIA</b>	<b>75</b>
4.1 TOMA DE LA MUESTRA EN MANIFOLD	75
4.1.1 Cantidad de muestra	75
4.1.2 Retiro de agua libre	76
4.1.3 Medida de propiedades	77
4.1.4 Muestra sin agua libre	77
4.1.5 Omisión solvente, rompedor y baño maría	77
4.1.6 Equipo de centrifugación	79
4.2 CALCULO DE DIAMETRO DE PARTICULA DE AGUA	80
4.2.1 Calculo de Reynolds y coeficiente de arrastre	82

4.3 INTEPRETACION DE RESULTADOS DE SOFTWARE	83
4.4 TAMAÑO DE PARTICULA PARA DISEÑO	86
4.5 INFLUENCIA DE %BSW EN EL DIÁMETRO DE PARTÍCULA	87
4.6 DISEÑO DE SEPARADOR BIFASICO	89
4.6.1 Criterios de diseño	89
4.6.2 Alternativa para diseño de tanques Gun Barrel	91
4.6.3 Parámetros de diseño utilizando la metodología	91
4.7 PROPUESTA PARA OPTIMIZACION DE LOS PROCESOS Y DEL DISEÑO DE LAS FACILIDADES DE PRODUCCION	92
4.7.1 Justificación	92
4.8 PROPUESTA DE DISEÑO DE UN GUN BARREL	93
4.9 DATOS DE ENTRADA PARA EL DISEÑO	94
<b>5. ANALISIS ECONOMICO</b>	<b>111</b>
5.1 ESTIMACIONES DEL PESO DEL TANQUE	111
5.1.1 Factores de ajuste	113
5.1.2 Análisis económico de la opción 1 de diseño	113
5.1.3 Análisis económico de la opción 2 de diseño	115
5.1.4 Análisis económico de la opción 3 de diseño	117
5.1.5 Análisis de económico de opción 4 de diseño	118
5.2 DECISIÓN DE DISEÑO	120
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>122</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>124</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>125</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>127</b>

## LISTA DE TABLAS

	<b>Págs.</b>
<b>Tabla 1</b> Valores de tensión interfacial para algunas sustancias	26
<b>Tabla 2</b> Calculo en Excel	63
<b>Tabla 3</b> Propiedades de la emulsión con aumento de temperatura	73
<b>Tabla 4</b> Propiedades medidas	77
<b>Tabla 5</b> Cálculo de la distribución de partícula	81
<b>Tabla 6</b> Análisis de percentiles con respecto a % BSW	90
<b>Tabla 7</b> Variación de la viscosidad y la gravedad especifica	95
<b>Tabla 8</b> Requerimientos de tiempo de residencia	97
<b>Tabla 9</b> Longitud costura-costura	97
<b>Tabla 10</b> Calculo de dimensiones en funcion de la relacion de esbeltez	98
<b>Tabla 11</b> Volúmenes con respecto a RE	99
<b>Tabla 12</b> Interpolación de datos	99
<b>Tabla 13</b> Datos para diseño	101
<b>Tabla 14</b> Dimensiones y tiempo de residencia de tanque de opción 1	102
<b>Tabla 15</b> Requerimientos de tiempo de residencia	103
<b>Tabla 16</b> Longitud costura-costura	104
<b>Tabla 17</b> Dimensiones con respecto a RE	104
<b>Tabla 18</b> Volúmenes con respecto a RE	105
<b>Tabla 19</b> Interpolación de datos	106
<b>Tabla 20</b> Datos de diseño	106
<b>Tabla 21</b> Dimensiones y tiempo de residencia de tanque de opción 2	107
<b>Tabla 22</b> Interpolación de datos	108
<b>Tabla 23</b> Dimensiones y tiempo de residencia de tanque opción 3	108
<b>Tabla 24</b> Interpolación de datos	109
<b>Tabla 25</b> Dimensiones y tiempo de residencia de tanque opción 4	109
<b>Tabla 26</b> Factores de ajuste	113
<b>Tabla 27</b> Cambios de tiempo de residencia con la temperatura opción	114
<b>Tabla 28</b> Precio del tanque opción 1	114
<b>Tabla 29</b> Cambios de tiempo de residencia con la temperatura opción 2	116
<b>Tabla 30</b> Precio del tanque opción 2	116
<b>Tabla 31</b> Cambios de tiempo de residencia con la temperatura opción 3	117
<b>Tabla 32</b> Precio del tanque opción 3	118
<b>Tabla 33</b> Cambios de tiempo de residencia con la temperatura opción 4	119
<b>Tabla 34</b> Precio del tanque opción 4	119

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Págs.</b>
<b>Figura 1</b> Proceso de emulsión	21
<b>Figura 2</b> Fases de una emulsión	22
<b>Figura 3</b> Emulsión tipo inversa	22
<b>Figura 4</b> Naturaleza antifatica de un tensioactivo	27
<b>Figura 5</b> Formación de micelas	28
<b>Figura 6</b> Tipo de sedimentación – Creaming	35
<b>Figura 7</b> Tipo de sedimentación – Floculación	36
<b>Figura 8</b> Tipo de sedimentación – Agregación	37
<b>Figura 9</b> Fotografía microscópica de una emulsión	41
<b>Figura 10</b> Difractor de luz laser	43
<b>Figura 11</b> Cortador de orificio	44
<b>Figura 12</b> Efecto de la fuerza dinámica	45
<b>Figura 13</b> Comparaciones de coeficientes de arrastre	50
<b>Figura 14</b> Variación de la gravedad específica con la temperatura	56
<b>Figura 15</b> Viscosidades cinemáticas a diferentes temperaturas	58
<b>Figura 16</b> Descripción Crystal Ball	67
<b>Figura 17</b> Funciones de Crystal Ball	69
<b>Figura 18</b> Propiedades de la emulsión respecto a la temperatura	71
<b>Figura 19</b> Muestra de aceite, 1000ml	76
<b>Figura 20</b> Agregando solvente	78
<b>Figura 21</b> Agregando rompedor	78
<b>Figura 22</b> Manipulación de zanahorias baño María.	79
<b>Figura 23</b> Radio de la centrifuga	80
<b>Figura 24</b> Comparación de coeficiente de arrastre	82
<b>Figura 25</b> Ajuste estadístico 22 API	84
<b>Figura 26</b> Ajuste Estadístico 22 API	85
<b>Figura 27</b> Propiedades estadísticas 22 API	86
<b>Figura 28</b> Percentiles 22 API	87
<b>Figura 29</b> Diámetro de partícula vs %BSW 22 API	88
<b>Figura 30</b> Comparación de BSW (laboratorio y estadístico)	89
<b>Figura 31</b> Viscosidad vs Temperatura	96
<b>Figura 32</b> Gravedad específica del aceite vs Temperatura	96
<b>Figura 33</b> longitud con respecto a RE	98
<b>Figura 34</b> Reynolds vs coeficiente de arrastre	102
<b>Figura 35</b> longitud vs diámetro	105

## TABLA DE ANEXOS

	<b>Págs.</b>
<b>ANEXO A.</b> HOJA DE CALCULO DE EXCEL PARA LAS PROPIEDADES DE LA EMULSION DE 22 API	127
<b>ANEXO B.</b> ECUACION DE DIAMETRO MINIMO DEL DISEÑO DE SISTEMA DE SEPARACION	129

## RESUMEN

**TITULO:** DESARROLLO DE UNA METODOLOGIA ESTADISTICA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE SEPARACION LIQUIDO-LIQUIDO (AGUA-ACEITE) APLICADA A CRUDOS PESADOS\*

**AUTORES:** FERNANDO ENRIQUE MARTÍNEZ ALBA, WILMAR ARIEL MORENO TRUJILLO\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Emulsiones, Tamaño de partícula, Estadística, tensión interfacial,

El estudio para analizar la velocidad de asentamiento de una emulsión directa está definida a partir de la ley de Stokes la cual posee una variable (tamaño de partícula) que actualmente es asumida por falta de parámetros de estudio, por tal razón al asumir esta variable genera incertidumbre y por ende cometer errores a la hora de diseñar tanques de separación liquido-liquido GUN-BARREL. Según el tipo de crudo este tamaño de partícula tiende a variar y esto genera un punto de partida para asumir dicho tamaño.

La finalidad de generar este proyecto es encontrar una metodología estadística donde se buscan datos a partir de pruebas de laboratorio regidas por la norma ASTM 4007-08, las cuales permiten conocer tamaños de partícula para posteriormente aplicar principios de estadística. En base a la distribución estadística encontrada es necesario buscar el tamaño de partícula que genere un diseño de tanque óptimo según el caudal al cual llegue el crudo al tanque y no tener problemas de economía y sobredimensiones.

El proyecto presenta en su fase inicial generalidades de emulsiones. En segundo lugar los equipos y ejemplos de diferentes tipos de mediciones del tamaño de partícula. Posteriormente se crea una metodología en donde se muestra como encontrar un tamaño de partícula que genere un óptimo diseño de tanques según la velocidad de asentamiento de la ley de Stokes. Finalmente se hace un diseño basado en la forma como se diseña actualmente y otro con la metodología propuesta y hacer comparaciones de tipo económico generando de tal forma un aporte a la industria petrolera.

---

\*Proyecto de grado\*\* Facultad de Físico-Químicas. Escuela de ingeniería de petróleos. Director Ingeniero Julio Cesar PerezAngulo

## ABSTRACT

**TITLE:** development of statistical methodology for the design of separation systems liquid-liquid (water-oil) applied to heavy oil\*

**AUTORS:** FERNANDO ENRIQUE MARTÍNEZ ALBA, WILMAR ARIEL MORENO TRUJILLO\*\*

**KEYWORDS:** Emulsions, Particle size, statistical, Interfacial tensión.

The study on the settling velocity of a direct emulsion is defined from Stokes' law which has a variable (particle size) is now assumed by lack of study parameters, for that reason to assume this variable generates uncertainty and therefore make mistakes when designing tanks liquid-liquid separation GUN-BARREL. Depending on the type of oil that particle size tends to vary, and this creates a starting point to assume that size.

The purpose of creating this project is to find a statistical methodology which is seeking data from laboratory tests governed by ASTM 4007-08, which allowed me to meet particle size then apply statistical principles. Based on the statistical distribution found is necessary to find the size of particle that generates an optimal tank design according to the flow which reaches the oil to the tank and not have problems of economy and oversize.

The project in its initial phase of emulsions general. Secondly, the equipment and examples of different types of particle size measurements. Subsequently created a methodology which shows how to find a particle size which produces an optimal tank design depending on the speed of settlement of the law of Stokes. Finally, a design based on the way today and another is designed with the methodology and economic comparisons of generating such a contribution so the oil industry.

---

\*Thesis\*\* Physiochemical Engineering College. Petroleum Engineering School. Director: Engineer Julio Cesar Pérez Angulo

## INTRODUCCION

La presente investigación hace énfasis en la emulsión directa W/O y se define como fase continua el aceite y fase dispersa el agua. La causa principal de este tipo de emulsión es el proceso de formación natural que ocurre en los yacimientos petroleros y está asociado también con el tipo de sistema de producción cuando son llevados desde el yacimiento a superficie.

La característica principal de este tipo de emulsión es debido a que están presentes dos líquidos inmiscibles, que aparentemente forman una mezcla homogénea. La fase dispersa en una emulsión W/O se encuentra en forma de gotas o partículas esféricas que varían en tamaños en la misma mezcla y están sometidas a una serie de fenómenos que permiten a las partículas su esfericidad y que además perdure suspendida en la fase continua el crudo.

Para considerar el estudio de estas partículas es necesario tener en cuenta su formación. Uno de ellos es el grado de agitación o turbulencia causada en los sistemas o líneas de producción en campos petroleros, de esto depende la cantidad de partículas que se introduzcan en la fase continua y el grado de facilidad para poder retirar estas partículas en posteriores sistemas de tratamiento de deshidratación al crudo.

La indagación de la necesidad que causa separar las fases de una emulsión se realizó por el interés de conocer los diferentes diámetros de partículas de agua presentes en una emulsión directa. Establecer como consecuencia de la medición un diámetro de partícula más pequeño presente en una emulsión, representa el grado de dificultad para causar su separación o sedimentación,

como ocurre en sistemas de tratamiento tanques GUN BARREL que se diseñan con el fin de tratar emulsiones liquido-liquido y sus dimensiones dependen drásticamente del tamaño de partícula, generando impacto económico para diseñar un separador con diámetros de partícula que no permita separar el 100% de la fase dispersa.

La investigación de cómo medir el diámetro de partícula se realizó por el interés de plantear una metodología práctica que permita identificar los diferentes tipos de distribución estadística y su respectivo ajuste teniendo como finalidad encontrar diámetro de partícula más pequeño en una emulsión directa.

Por otra parte, establecer las variables que pueden afectar el tamaño y distribución de las partículas, es importante para hacer una medición de alto grado de confiabilidad de la variable de estudio en esta investigación.

## 1. EMULSIONES

El petróleo y el agua fluyen del yacimiento al pozo y de allí a la superficie; durante este trayecto experimentan turbulencia, la cual comúnmente generara la formación de las emulsiones, por lo que se hace necesarios tratamientos físico-mecánicos y químicos para una óptima separación de fases.

Una emulsión es un sistema heterogéneo donde existe una mezcla de dos líquidos inmiscibles en la cual un líquido relativamente está disperso en el otro en forma de gotas. El líquido que está disperso (agua) se conoce como fase dispersa, el otro (aceite) se conoce como fase continua.

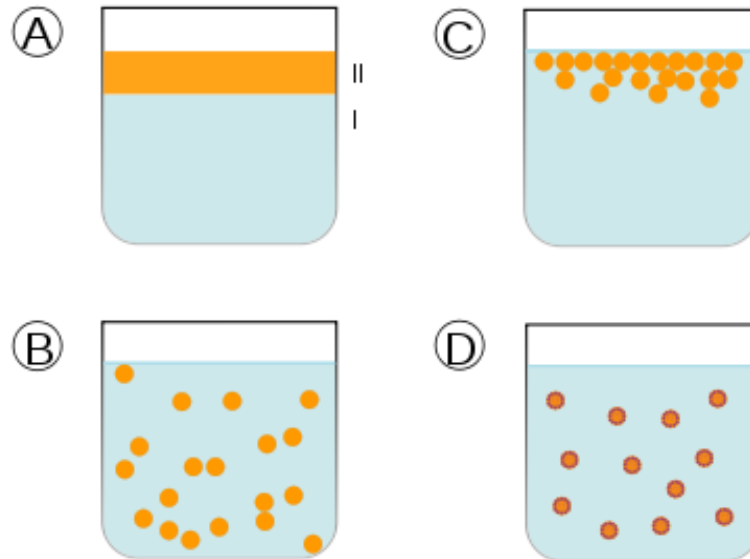
Para la formación de una emulsión estable se necesitan tres condiciones:

- Dos líquidos inmiscibles: Agua y petróleo.
- La agitación y turbulencia: Las emulsiones no se generan espontáneamente, puesto que debe existir la agitación para dispersar un líquido en diminutas gotas dentro del otro.
- Agente emulsificante: Se debe a la presencia de agentes naturales que estabilizan la emulsión tales como; arcillas, asfáltenos y parafinas donde estos migran a la interface de la gota dispersa generando una película fuerte y elástica sobre la misma. La presencia de esta película dificulta la coalescencia de las gotas.

Con la consulta de esta información se definen parámetros básicos de este tipo emulsiones y sus características básicas, los cuales permiten validar un óptimo funcionamiento del proyecto.

En la figura 1 Se puede observar la formación general de las emulsiones y como se distribuye la fase dispersa en la fase continua de dicha emulsión.

**Figura 1** Proceso de emulsión



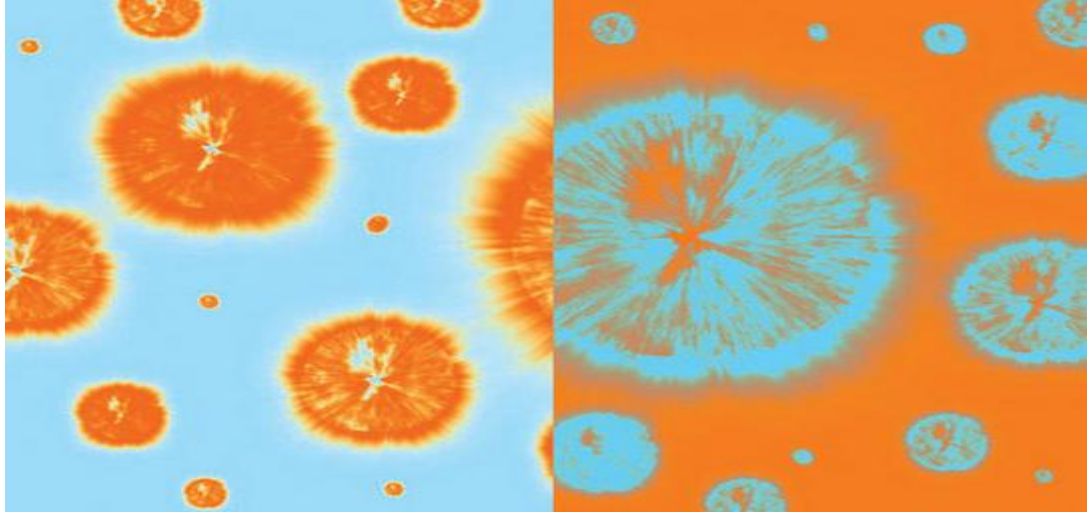
Fuente: [www.wikimedia.com](http://www.wikimedia.com)

## 1.1 CLASIFICACIÓN DE UNA EMULSIÓN

Las emulsiones se clasifican según las propiedades que tengan la fase continua como la fase dispersa y sus propiedades respectivamente.

**1.1.1 Según las fases de la emulsión** Existen dos tipos de emulsión líquido-líquido según la fase continua. La figura 2 muestra un ejemplo de los dos tipos de emulsión, donde la parte izquierda representa una emulsión directa y en la parte derecha una emulsión inversa.

**Figura 2** Fases de una emulsión

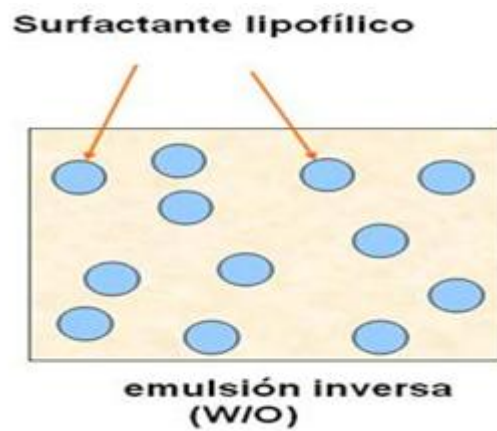


Fuente: [www.quo.es](http://www.quo.es)

**1.1.1.1 Emulsión directa** El agua se encuentra en la fase dispersa y el aceite es la fase continua.

**1.1.1.2 Emulsión inversa** El aceite se encuentra en fase dispersa y el agua es la fase continua.

**Figura 3** Emulsión tipo inversa



Fuente: [www.comunidadpetrolera.com](http://www.comunidadpetrolera.com)

**1.1.2 Según la facilidad para romper la emulsión** La facilidad para romper una emulsión depende de la estabilidad y el medio en el que fue formada teniendo en cuenta aspectos como su agitación y agentes emulsificantes, y se pueden definir en dos tipos:

**1.1.2.1 Emulsiones flojas** Estas emulsiones se rompen fácilmente con cualquier tipo de tratamiento y tiempos relativamente cortos.

**1.1.2.2 Emulsiones apretadas** Son difíciles de romper, estas generalmente requieren tratamientos combinados.

**1.1.3 Según su estabilidad** Estabilidad es como una resistencia que tienen las gotas a la coalescencia. Cuando se produce la sedimentación de las gotas como consecuencia de la diferencias de densidad entre las fases, sin crecimiento del tamaño de las gotas, normalmente no se habla de destrucción de la emulsión sino de floculación. La dispersión del sistema puede conseguirse nuevamente sin dificultad. La velocidad del proceso de coalescencia es la única medida de la estabilidad de la emulsión. Puede seguirse determinando el número de gotas en función del tiempo. Esta velocidad depende, entre otros, de los factores siguientes:

- La naturaleza del recubrimiento interfacial.
- La existencia de barreras electrostáticas en la interface. que provienen el contacto entre gotas.
- La viscosidad de la fase continúa.
- La temperatura.

## Propiedades reológicas

- Textura
- Extensibilidad
- Propiedad De flujo

## Estabilidad física

- Coalescencia
- Sedimentación
- Agregación
- Inversión de fases

Según su estabilidad las emulsiones pueden ser:

**1.1.3.1 Emulsión inestable** Se caracteriza porque el diámetro de las gotas varía ampliamente y además porque la mayoría de ellas son significativamente grandes, por consiguiente su asentamiento es rápido.

**1.1.3.2 Emulsión estable** Este tipo de emulsión es caracterizada por el diámetro de las gotas que son excesivamente pequeñas que inhibe su rápido asentamiento.

## **1.1.4 AGENTES QUE PERMITEN QUE LA EMULSION SEA ESTABLE**

Existen agentes los cuales generan inestabilidad en las emulsiones así que se referencia aquellos agentes que más inciden en la estabilidad de una emulsión.

**1.1.4.1 Tensión interfacial** En la interfaz líquido-líquido, la tensión interfacial es la fuerza necesaria para reducir el contacto real entre las dos fases. Las moléculas en la fase son atraídas en todas direcciones.

No se aplica ninguna fuerza neta a la molécula. Sin embargo en el límite entre las fases, las moléculas están en contacto con otras moléculas y experimentan fuerzas diferentes.

Cuando se forma una emulsión, el área de contacto de superficie aumenta, aumentando así la energía interfacial total. Como resultado, las moléculas tienden a migrar de la interfaz al interior de la fase y reducir el área del contacto real entre las moléculas diferentes.

La tensión interfacial determina la tendencia de los fluidos para establecer contacto entre ellas. Por lo tanto, la tensión interfacial es el fluido de la forma de la gota de un líquido. Si la tensión interfacial es alta, las moléculas en el líquido están fuertemente atraídas a otras. Si la molécula de agua está en contacto con un aceite tal como una emulsión, su forma se verá afectada por la tensión interfacial en la interfase líquido/líquido. Si la tensión interfacial en el líquido es menor, la forma de la gota se torna más elipsoidal.

La tabla 1 Expone algunos valores de tensión interfacial para algunas sustancias:

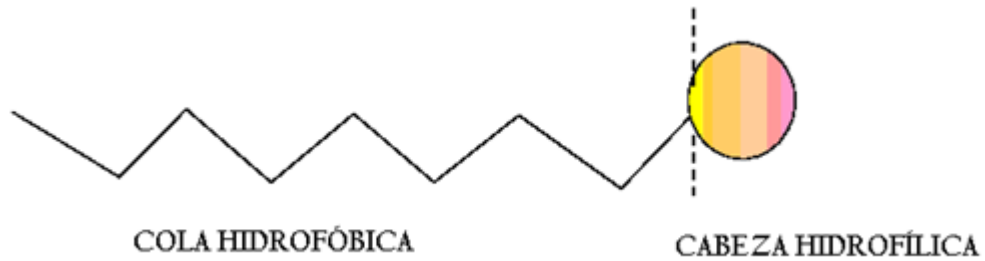
**Tabla 1** Valores de tensión interfacial para algunas sustancias

SUSTANCIA	TENSION INTERFACIAL
AGUA	73 DINAS/CM
MERCURIO	480 DINAS/CM
BENCENO	28 DINAS/CM
ETANOL	22 DINAS/CM

Los agentes activos de la fase continua interfieren con la habilidad de las moléculas para interactuar con otras y, por ello, es menor la tensión interfacial de la sustancia. Los surfactantes empleados en aplicaciones industriales usualmente causan una dramática disminución de la tensión interfacial cuando son usadas en pequeñas concentraciones.

Químicamente, los surfactantes son moléculas anfipáticas. Esto es, ellos tienen dos diferentes características, una polar y otra no polar, en diferentes partes de la misma molécula. Por lo tanto, una molécula de surfactante tiene tanto características hidrofílicas (con afinidad por el agua) como hidrofóbicas (sin afinidad por el agua). Simbólicamente, una molécula de surfactante puede ser representada como que tiene una “cabeza polar” una “cola no polar” como se muestra en la figura 4.

**Figura 4** Naturaleza anfipática de un tensoactivo



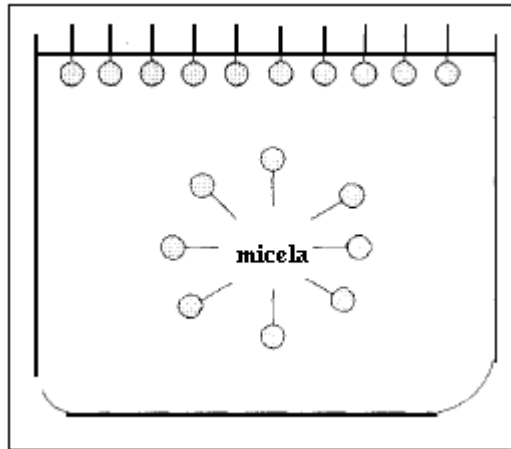
Fuente: [www.comunidadpetrolera.com](http://www.comunidadpetrolera.com)

El grupo hidrofóbico en un surfactante para su uso en un medio acuoso es usualmente una cadena hidrocarbonada, pero puede ser también una cadena de fluorcarbonos o siloxanos de determinada longitud. El grupo hidrofílico es polar y puede ser ya sea iónico o no iónico.

Debido a que las moléculas de surfactantes tienen tantas partes hidrofílicas como hidrofóbicas, el mejor lugar atractivo para ellos en el agua es en la fase continua donde las fuerzas de atracción y repulsión se equilibran. Otra forma en la que los surfactantes interactúan para equilibrar las fuerzas naturales atracción y repulsión es mediante la formación de micelas.

Las micelas consisten de una región interior de carácter hidrofóbico en donde las colas hidrofóbicas interactúan con otras de su mismo tipo. Esta región hidrofóbica está rodeada por la región hidrofílica en donde las cabezas de las moléculas del surfactante interactúan con el agua.

**Figura 5** Formación de micelas



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Emulsión>

Las moléculas del surfactante están disociadas a bajas concentraciones en agua. A mayor concentración del surfactante en el agua, las micelas se forman y este punto es denominado “**concentración crítica de micela (CMC)**”. La tensión interfacial del agua sufre una disminución estrepitosa, y la detergencia de la mezcla se incrementa dramáticamente en la CMC.

**1.1.4.2 Surfactantes ó Emulsionantes** Su función es aumentar la tensión interfacial entre las fases, provocando la emulsión.

Los surfactantes naturales del crudo son: asfáltenos, resinas, cresoles, sales, metálicas, sedimentos, arcillas, productos de corrosión y sólidos.

El grado de estabilidad de las emulsiones está relacionado con la razón de película (volumen de surfactante/volumen de la fase dispersa) y la viscosidad del crudo. Esto genera lo siguiente.

- Aumenta el tiempo de floculación de las gotas dispersas.
- Genera mayores fracciones de asfáltenos y resinas polares están presentes en los crudos de alta viscosidad y densidad.

- Un crudo de alta viscosidad permite mantener gotas grandes en suspensión oponiéndose a una menor resistencia al asentamiento.

Esto depende de cuán grande sea la viscosidad y la razón de la película.

**1.1.4.3 Agentes tensioactivos como emulsificantes** Estos agentes son moléculas con una estructura muy característica. Este tipo de estructura les habilita para adsorber en las interfases, formar agregados y auto asociarse en soluciones acuosas. Estas moléculas están caracterizadas por la posesión de dos partes de naturaleza opuesta, una polar y no polar. La parte polar o hidrófila de la molécula puede llevar una carga positiva o negativa, y es esta parte la que define al agente tensioactivo como catiónico o aniónico respectivamente. Otros agentes tensioactivos en cambio, no muestran carga iónica (no-iónicos). La parte apolar o hidrófoba de la molécula generalmente suele ser una cadena longitudinal de hidrocarburos.

**1.1.4.4 Clases de agentes tensioactivos** Los agentes tensioactivos se pueden clasificar en función de la naturaleza iónica de la cabeza:

- **Aniónicos:** se trata de los agentes tensioactivos que presentan la cabeza hidrófila con carga negativa. Todos ellos poseen un contra-ion positivo que suele ser el  $\text{Na}^+$ .
- **Catiónicos:** Los agentes tensioactivos presentan una cabeza positiva, como por ejemplo el ion trimetil amonio ( $-\text{N}(\text{CH}_3)_3^+$ ) y contra-iones negativos como el  $\text{Br}^-$ .
- **Zwitteriónicos:** Estos agentes tensioactivos contienen cargas positivas y negativas en la misma molécula, convirtiéndola en moléculas neutras sin contra-iones.

- **No-iónicos:** Los no-iónicos carecen de grupos polares cargados, pero poseen grupos como los etoxilatos,  $-(O-CH_2-CH_2)_m-OH$ , que muestran gran afinidad hacia las moléculas de agua debido a las fuertes interacciones dipolo-dipolo en los enlaces de hidrógeno. La parte hidrófoba del agente tensioactivo generalmente es una cadena simple de hidrocarburo la cual contiene principalmente grupos olefínicos.

**1.1.4.5 Signo de la emulsión tensioactivo** El signo de la emulsión depende más del tensioactivo empleado que de las proporciones relativas de las fases oleosas y acuosas o de la metodología de preparación de la emulsión.

- **O/W:** Tensioactivo más soluble en agua que en aceite.
- **W/O:** Tensioactivo más soluble en aceite que en agua.

**1.1.4.6 Fuerzas de atracción de van der Waals** Es una fuerza atractiva o repulsiva entre moléculas distintas a aquellas debidas al enlace covalente o a la interacción electrostática de iones con otros o moléculas neutras. Esto incluye las siguientes fuerzas:

- Dipolo-dipolo (Keesom).
- Dipolo inducido-dipolo (Debye).
- Fuerzas de dispersión.

## 1.2 PARÁMETROS QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE UNA EMULSIÓN

La estabilidad de una emulsión se ve afectada por varios parámetros que involucran procesos de termodinámicos y de forma generando que la emulsión sea tanto estable como inestable.

**1.2.1 Relación de los volúmenes de las fases** Usualmente el aumento del volumen de la fase dispersa induce una disminución de la estabilidad de la emulsión debido a la reducción de la distancia entre gotas.

**1.2.2 Distribución del tamaño de gota** En una emulsión donde coexistan varios tipos de tamaño de partícula, las más grandes tienden a seguir aumentando su tamaño a costa de las partículas más pequeñas lo que conlleva a la desestabilización de la emulsión. Por lo cual, una emulsión con una distribución de tamaño más uniforme es más estable.

**1.2.3 Temperatura** La variación de la temperatura causan un efecto indirecto en la estabilidad de una emulsión, debido a las alteraciones en la tensión interfacial, viscosidad y naturaleza de la película interfacial, solubilidad relativa del agente emulsificante en las dos fases, viscosidad de las fases líquidas, presión de vapor y la agitación térmica de las gotas de la fase dispersa.

## 1.3 PARÁMETROS ESPECÍFICOS DE LA INTERFACE AGUA-ACEITE

A nivel microscópico se tienen en cuenta los siguientes parámetros:

- Moléculas que actúan como emulsionantes naturales.
- Sólidos que actúan como emulsionantes naturales.

- Resistencia (mecánica) interfacial.
- Tensión interfacial entre los líquidos.
- Viscosidad de la película interfacial.
- Envejecimiento de la emulsión (aumenta la rigidez de la película interfacial).

## 1.4 PARÁMETROS ESPECÍFICOS DE LAS CONDICIONES DE LA EMULSIÓN

Las condiciones de las emulsiones están regidas por aspectos reológicos y físico-químicos generando estabilidad o inestabilidad en ellas. Los parámetros más importantes de las condiciones de una emulsión son:

- Temperatura (menos estable a mayor temperatura).
- Tamaño de la fase dispersa (menos estable a mayor tamaño de gota).
- Viscosidad de la fase continua (a menor viscosidad, menor estabilidad).
- Diferencia de densidad entre agua y petróleo.

## 1.5 CARACTERÍSTICAS DE LAS EMULSIONES

El método más apropiado para la deshidratación obedece a las características de la emulsión formada y de la naturaleza del componente emulsionado. Los factores más importantes que afectan la emulsión son:

**1.5.1 Tamaño de gota** Las gotas de menor tamaño toman más tiempo para sedimentarse por tener menos atracción gravitacional que las gotas de mayor tamaño. Cuando estas gotas están rodeadas de fuerzas externas, son más difíciles de romper o adherirse por impacto con otras gotas. Existen dispersión de gotas que son pequeñas y de tamaño uniforme que implica a que las gotas

no aumenten de tamaño suficiente por colisión entre ellas y por ende no sean depositadas por gravedad, lo que si existiría si hay gotas de diferentes tamaños.

**1.5.2 Resistencia de la película** La presencia de materia extraña en la emulsión aumenta la resistencia de la película que rodea la gota por fuerzas polares creadas que resisten a la presión y a deformaciones de flujo. Para romper la emulsión hay que destruir estas fuerzas polares haciendo un cambio en el sistema, por ejemplo inyectando desemulsificante, aplicando calor o un campo eléctrico.

En la emulsión las gotas más pequeñas de agua indican tensión superficial alta de la fase acuosa, por lo tanto posee una película de alta resistencia en su superficie y mayor curvatura o sea menor radio de gotas.

**1.5.3 Porcentaje de agua** Un alto porcentaje de agua tiende a reducir la dispersión en gotas pequeñas, al aumentar la cantidad de contactos por unidad de tiempo, causando una depositación rápida.

**1.5.4 Densidad diferencial** Entre más similares sean la densidad del crudo y la del agua emulsionados, más tiempo requerirá la sedimentación en condiciones similares de operación.

**1.5.5 Viscosidad de la fase continua (crudo)** La gota de agua debe sedimentarse a través del crudo con el fin de llegar hasta la capa de agua, en la interfase puede desprenderse o coalescer. La viscosidad del crudo crea fricción en la gota de agua y por lo tanto es una resistencia a la caída

## 1.6 PROCESOS QUE PERMITAN LA SEPARACION DE FASES DE UNA EMULSION

La sedimentación es el proceso de acumulación de partículas después de haber sido transportados. Las características de los depósitos dependen de la naturaleza de la fase continua. En el caso del crudo el agua se deposita cuando el movimiento en él se reduce por debajo de la velocidad de la carga.

En el proyecto se muestra los diferentes procesos de sedimentación y que efectos causa en las emulsiones de interés para concluir con cual se puede acoplar la metodología que se quiere implantar.

**1.6.1 Coalescencia de la fase interna** Se origina como consecuencia de la tensión interfacial

- Causa un cambio drástico en la distribución de tamaño de gota.
- El tamaño de gota inicial solo se podrá conseguir mediante otro proceso de emulsificación.

**1.6.2 Creaming** Este tipo de procesos se origina cuando los estabilizadores se disuelven en la fase continua y aumentan su viscosidad, lo que restringe la movilidad de las gotas y las colisiones entre ellas y, por tanto, minimiza la coalescencia, generando los siguientes fenómenos:

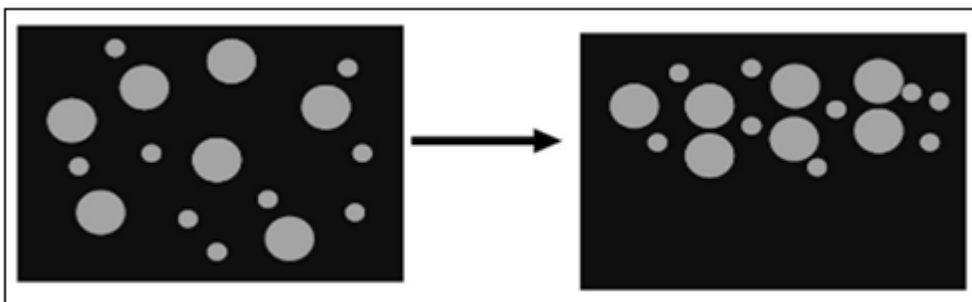
- se origina la diferencia de densidades entre ambas fases.
- la distribución de tamaño de gota cambia localmente.

En la ecuación (1.1) propuesta por Navier Stokes se observa la velocidad desedimentación y como incluye la diferencia de densidades, viscosidad y el tamaño de partícula.

$$\frac{Dx}{dt} = \frac{2r^2(\rho_{fi} - \rho_{fe})g}{\mu} \quad (1.1)$$

En la figura 6 Se observa que las partículas en la fase continúa tiende a subir a causa de que la distribución cambia y la viscosidad aumenta impidiendo la sedimentación por lo que se puede decir es que las partículas tienden a flotar y no a sedimentarse.

**Figura 6** Tipo de sedimentación - Creaming



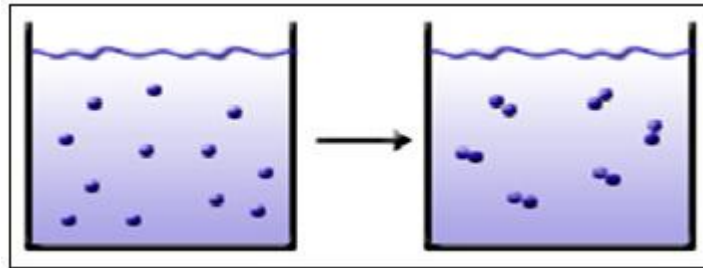
Fuente: [www.wikimedia.com](http://www.wikimedia.com)

**1.6.3 Floculación** Se define como un proceso por el cual dos o más gotas se juntan pero no se unen. En la práctica, en las emulsiones de alimentos, las gotas más grandes (> 2 mm) floculan más rápido y la floculación es promovida por este tipo de sedimentación.

La emulsión de gotitas flocula a través de la interacción de las macromoléculas adsorbidas entre ellas. Floculación por puente es un fenómeno complejo y depende del tamaño, del tipo, la cantidad de macromoléculas usada en el sistema. Además, la velocidad de floculación puede afectarse por el pH y la fuerza iónica del ambiente acuoso.

En la figura 7 se observa que las partículas de agua emulsionadas se acercan unas a otras pero no coalescen solo se acercan con esto se puede decir que la partículas están sufriendo un proceso de floculación.

**Figura 7** Tipo de sedimentación–Floculación

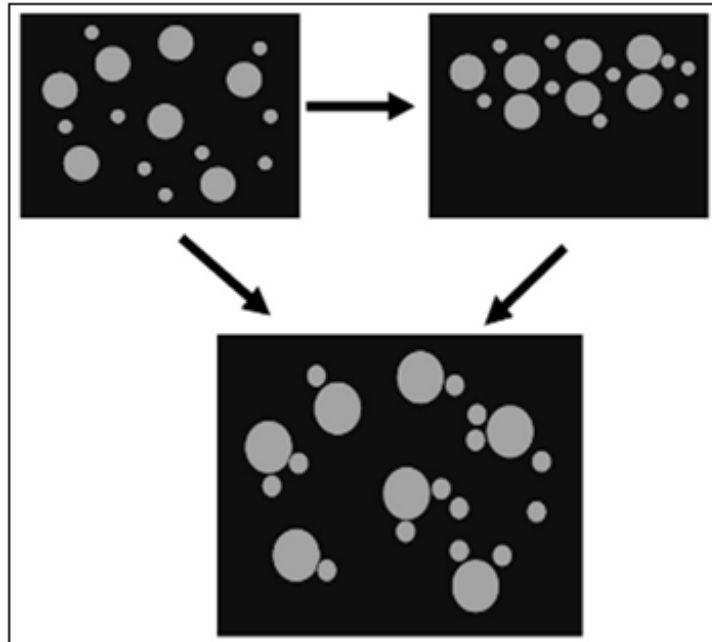


Fuente: [www.comunidadpetrolera.com](http://www.comunidadpetrolera.com)

**1.6.4 Agregación** Se origina como consecuencia de las fuerzas de atracción entre las partículas. El tamaño de gota permanece constante y la distribución inicial se puede conseguir por agitación.

Este proceso es donde se agrega agua para formar la emulsión como tal, en la figura 8 Se muestra que es un proceso cíclico donde se observa los diferentes movimientos que tienen las partículas sin necesidad de variar su distribución y tamaño.

**Figura 8** Tipo de sedimentación - Agregación



Fuente:www.wikipedia.com

## 1.7 PREVENCIÓN DE EMULSIONES

Generalmente en campos petroleros los métodos de producción de crudo no son los ideales para prevenir la formación de emulsiones, sin embargo, sustituir los métodos y equipos de producción para la prevención de emulsiones no es económicamente viable.

## **2. METODOS DE MEDICION DEL TAMAÑO DE PARTICULA EN LA EMULSION**

Es conveniente expresar el tamaño de una partícula por medio de una sola dimensión lineal. Pero una sola dimensión resulta insuficiente para descubrir objetos irregulares como lo son en ocasiones las gotas en una emulsión.

El tamaño de la partícula se puede establecer de una manera mucho más útil midiendo una propiedad característica de una partícula irregular que pueda ser relacionada con la misma propiedad de una partícula con forma regular. Se elige una esfera como forma regular de referencia. Los tamaños, tanto de partículas regulares como irregulares, pueden ser entonces descritos confiablemente como “equivalentes a una esfera de diámetro  $d$ ”, combinando de esta manera los parámetros de tamaño y forma e incorporando las variaciones de tamaño aparente. Se establece por lo tanto con esta definición un tamaño de partícula reproducible e inequívoca que tiene una sola dimensión.

Este tipo de estimaciones se hacen con el fin de establecer uniformidad en la variable de estudio que se tratara en el proyecto generando un campo de estudio y lograr el objetivo de crear una metodología.

### **2.1 DESCRIPCIÓN DE FORMA Y TAMAÑO DE PARTICULA**

Para realizar un análisis de las emulsiones agua-aceite, es necesario obtener un diámetro promedio de partícula que conforman dicha emulsión. Para lograrlo

se debe analizar una muestra significativa y realizar una distribución del tamaño de las partículas presentes en dicha muestra.

## **2.2 EFECTOS DEL TAMAÑO DE PARTICULA DE AGUA DE LA FASE DISPERSA**

El tamaño de gotas y distribución de tamaño de gotas tienen una influencia sobre la viscosidad de las emulsiones. Sin embargo es prácticamente imposible estudiar estos factores independientemente, ya que para variar dicho tamaño o distribución se deben variar otros factores como la tensión interfacial o el tipo y la concentración de surfactante, para resumir más esta definición se puede decir que:

- Cuando menor el tamaño de gota, mayor la viscosidad.
- Cuando más amplia la distribución de tamaño de gota, menor la viscosidad.

## **2.3 FACTORES QUE INCIDEN EN LA PARTÍCULA DE AGUA**

Las partículas de agua en una emulsión tienen un volumen muy pequeño delimitado casi completamente por la fase continua afectada en su mayoría por fenómenos físicos

**2.3.1 Tensión interfacial** En la interfase entre dos líquidos inmiscibles existe una cantidad de energía libre que surge del desbalance en las fuerzas cohesivas entre los dos líquidos. Esta energía es consecuencia de las tensiones interfaciales de los dos líquidos, y evita que se emulsionen espontáneamente.

Esta energía causa que la interfase se contraiga para formar la área interfacial más pequeña posible. En una emulsión la fase dispersa siempre tiende a formar glóbulos esféricos ya que de ésta manera se tiene el área interfacial más pequeña por unidad de volumen de líquido. Estas gotas tienden a coalescerse para formar gotas más grandes, con el fin de reducir aún más el área interfacial. En una emulsión cruda éste proceso continúa hasta que se logra la separación de las dos fases por completo.

Las unidades de medida de la tensión interfacial son las mismas que las de la tensión superficial.

## **2.4 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA DE AGUA**

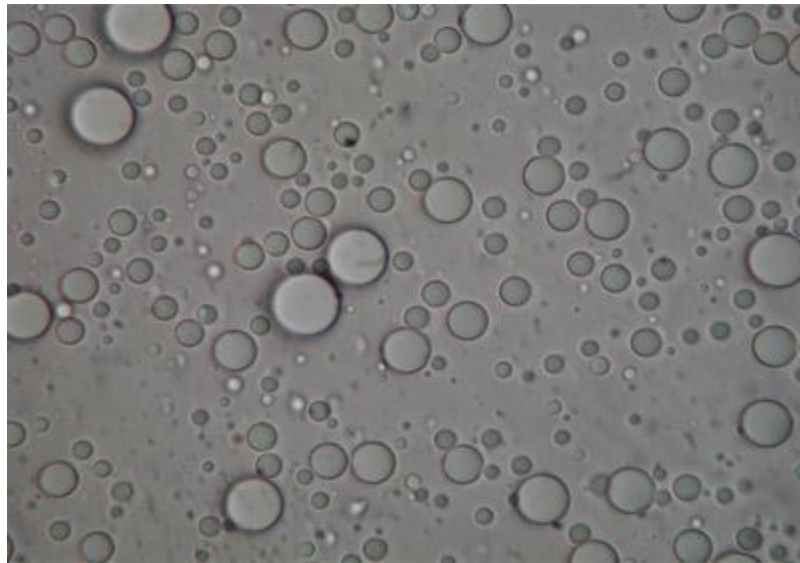
Medir las partículas es un trabajo tedioso debido a muchos factores, entre los que predominan el hecho de que las partículas son muy pequeñas, por lo que debe existir algún método de observación que las magnifique, o bien debe utilizarse un método donde no sea necesario la observación directa de las partículas, o por decirlo mejor no tener demasiada incertidumbre de su tamaño.

Existen diferentes métodos que permiten realizar mediciones precisas de las partículas, o bien hacer estimaciones prácticas de su tamaño. Algunos de los métodos utilizados se presentan a continuación:

**2.4.1 Microscopia y análisis de imágenes** La observación directa o la fotografía microscópica es el método más simple, y el único que se considera absoluto, este permite pronunciar un juicio acertado sobre el tamaño y la forma de las gotas, pero el problema es que se convierte muy tedioso y a menudo complicado hacer medidas objetivas.

El límite inferior de la microscopía es del orden de  $1\mu\text{m}$ , en buenas condiciones de iluminación y contraste. Sin embargo para tales dimensiones, el movimiento browniano se vuelve un problema y se requiere utilizar películas muy sensibles y flash para tener una fotografía más nítida.

**Figura 9** Fotografía microscópica de una emulsión



Fuente: [www.noticias.uanl.mx](http://www.noticias.uanl.mx)

Las gotas grandes son mayores a  $100\mu\text{m}$  que pueden, por otra parte, aplastarse entre las láminas y por lo tanto tener unos diámetros aumentados, sin embargo esto se puede solucionar con láminas especiales.

**2.4.2 Difracción de luz laser** Cuando un haz paralelo de luz coherente monocromática (laser) pasa a través de una pequeña zona conteniendo partículas o gotas, se forma un patrón de difracción superpuesto a la imagen, y mucho más amplio que aquella.

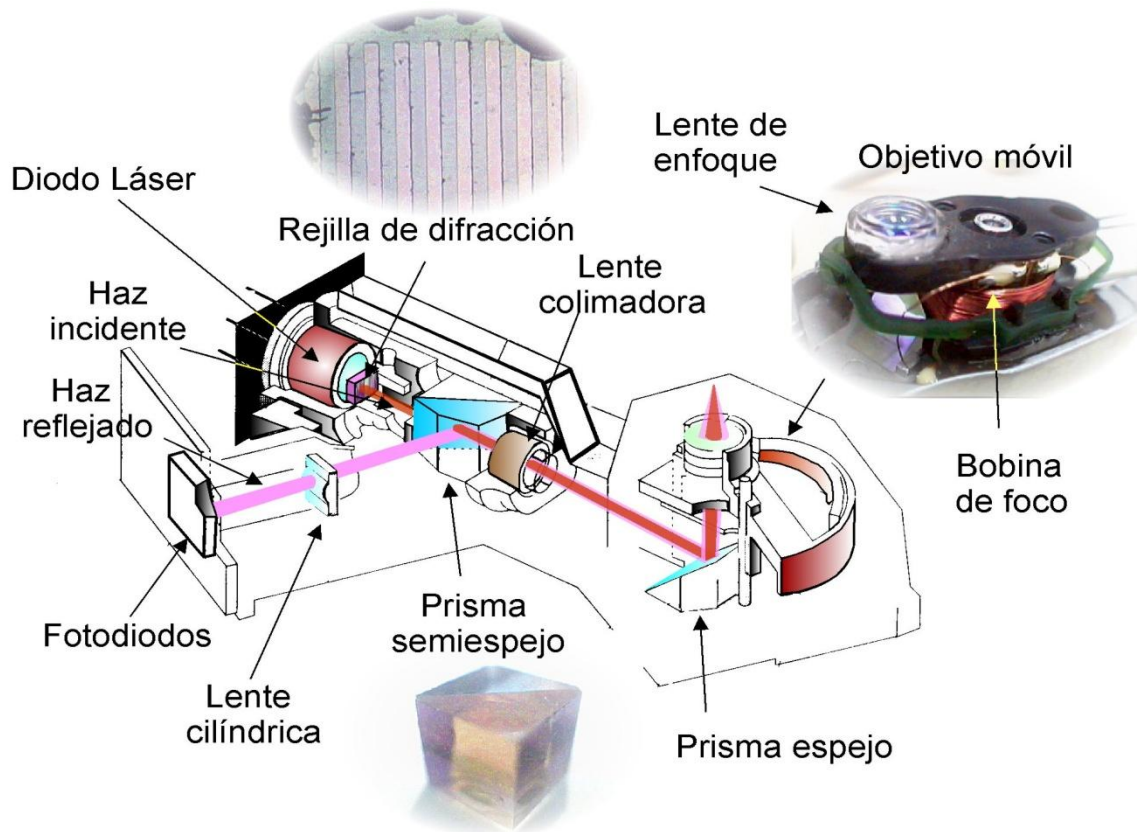
Si se coloca una lente convergente después de la zona que contiene la dispersión, y se ubica una pantalla en el plano focal del lente, la luz no

difractada forma una imagen en el foco, y la luz difractada forma un conjunto de anillos concéntricos alternativamente blancos y negros, llamado patrón de fraunhofer.

A partir de la información detectada de intensidad de luz difractada en función del ángulo de difracción, se puede calcular, la distribución de tamaño de partículas presentes en la dispersión. Al cambiar la distancia focal del lente, se pueden cubrir varios rangos de tamaño entre 1  $\mu\text{m}$  y 2000  $\mu\text{m}$ . El rango de detección es mucho mayor que aquel de los demás aparatos, ya que puede haber un factor 100 entre el tamaño de la partícula más pequeña y el tamaño de la más grande.

En la figura 10 se observa las partes importantes de un difractor de luz laser y como es su funcionamiento, hay que tener en cuenta que este tipo de instrumentos no se encuentran disponibles en el país además es muy costoso y su manipulación es muy compleja.

**Figura 10** Difractor de luz laser



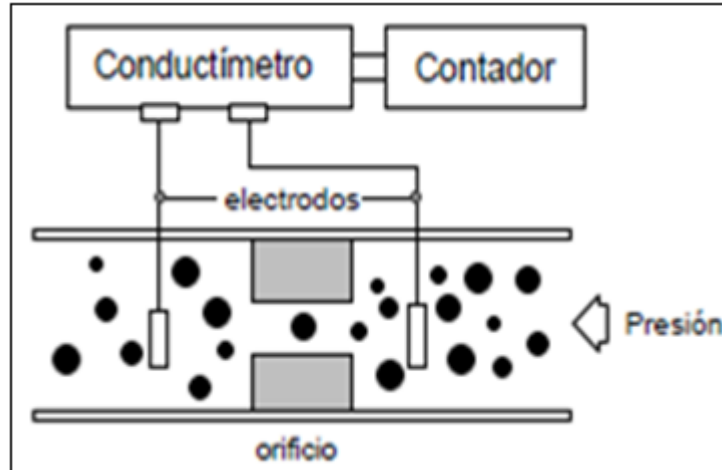
fuelle: [www.buscaunhueco.com](http://www.buscaunhueco.com)

**2.4.3 Cortadores de orificio** Cuando una partícula o gota pasa a través de un orificio pequeño sumergido en una solución electrolítica, se modifican las líneas de corriente dentro del orificio, y por lo tanto la conductividad electrolítica entre dos electrodos situados a un lado y otro del orificio.

La señal eléctrica obtenida al pasar la partícula a través del orificio está relacionada con su diámetro, siempre y cuando dicho diámetro sea del mismo orden de magnitud que el diámetro del orificio.

En la figura 11 se observa el esquema de medida de tamaño de partícula sus partes fundamentales.

**Figura 11** Cortador de orificio



Fuente: cuaderno FIRP 747

**2.4.4 Sedimentación** La velocidad de sedimentación de una esfera en un campo gravitacional natural depende del tamaño de las gotas. Este tipo de velocidad está definida por la ley de Stokes hallada en 1850:

$$F_r = 6\pi R\mu V \quad (2.1)$$

Donde  $\mu$  es la viscosidad del fluido, R el radio de la gota o esfera, V es la velocidad de caída y F la fuerza de resistencia a la caída. Muy rápidamente se obtiene una velocidad límite, y la fuerza se convierte al peso aparente de la gota. A partir de ello se obtiene el radio de la esfera.

$$R = \sqrt{\frac{9\mu V}{2\Delta\rho g}} \quad (2.2)$$

La validez de esta ley está limitada por:

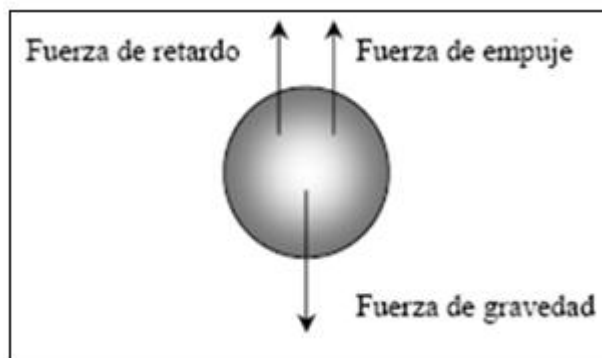
- Las gotas deben ser esféricas en su totalidad, por lo tanto, deben ser no deformables.
- Las emulsiones no deben ser muy diluidas.

- Por el carácter infinito o inmóvil del fluido, lo cual descarta los movimientos de convección o de contracorriente, y el movimiento browniano.
- El número de Reynolds debe ser menor a 2 para que la ley de Stokes se cumpla.

Para entender más sobre el suceso del movimiento de la partícula en la fase continua se puede observar las fuerzas que actúan en el proceso.

Las fuerzas que actúan sobre una partícula esférica que sedimenta a través de un fluido bajo la influencia de la gravedad son de empuje, de retardo y de gravedad, estas fuerzas son denominadas fuerzas dinámicas.

**Figura 12** Efecto de la fuerza dinámica



Fuente: [www.google.com](http://www.google.com)

La ley de Newton para dicha partícula tomaría la siguiente forma:

$$ma = \rho_p \left(\frac{\pi}{6}\right) D^3 g - \rho_m \left(\frac{\pi}{6}\right) D^3 g - F_d \quad (2.3)$$

Donde:

$$\begin{aligned}
 ma &= \text{Aceleración hacia abajo} \\
 \rho_p \left(\frac{\pi}{6}\right) D^3 g &= \text{Fuerza de gravedad}
 \end{aligned}$$

$\rho(m(\pi/6) D^3 g)$	=	Fuerza de empuje
$F_d$	=	Fuerza de retardo
D	=	Diámetro de la partícula
M	=	Masa de la partícula
g	=	Aceleración de la gravedad
a	=	Aceleración de la partícula
$\rho$	=	Densidad

Las fuerzas de retardo, o de resistencia del aceite, crecen al aumentar la velocidad y son cero para la velocidad cero. De esta forma, si una partícula parte del reposo su velocidad inicial es cero, por lo que en este punto la fuerza de retardo tendrá el mismo valor; conforme la partícula se acelera la fuerza de retardo crece, al aumentar la velocidad, hasta igualar la fuerza de gravedad menos la fuerza de empuje. En esta condición, donde la suma de fuerzas que actúan es cero, la partícula continúa su movimiento a velocidad constante.

**2.4.5 Centrifugación** La centrifugación es una de las técnicas más importantes de separación, donde se explota la propiedad variada de sedimentación de las sustancias para su alineamiento mediante la aplicación de un campo de centrifugación.

Este método es basado en el principio de sedimentación nombrado con anterioridad. Cuando una partícula sedimenta en una fase continua da lugar a un empuje sobre la fase continua equivalente al peso del líquido desplazado.

Las partículas de agua en una emulsión w/o, son asumidas con dimensiones esféricas siendo conocida una propiedad de interés en este estudio la densidad. La fuerza neta experimentada en una centrifugación es conocida como velocidad angular donde cambia g que es la gravedad por w que da una medida de la gravedad aumentada n veces de acuerdo a las revoluciones por minuto (rpm) y es expresada así:

$$F = \frac{4}{3}\pi r_p^3 (\rho_p - \rho_m) \omega^2 r \quad (2.4)$$

Donde:

- $\frac{4}{3}\pi r_p^3$  = Volumen de la esfera de radio r o d.  
 $\rho_p$  = Densidad de la partícula de radio d.  
 $\rho_m$  = Densidad de la fase continúa.  
 $\omega$  = Velocidad angular del rotor.  
 $r$  = Distancia del centro de rotación al eje de central.

Las partículas generan fricción a medida que sedimentan en la fase continua, asumiendo que las partículas son esféricas y se sedimentan a una velocidad conocida, el coeficiente de fricción oponiéndose al movimiento llama fuerza de arrastre dado por la ley de Stokes.

$$F_0 = 6\pi\mu r_p V \quad (2.5)$$

Donde:

- $F_0$  = Es el coeficiente de fricción de la partícula.  
 $\mu$  = Viscosidad, lb/ft\*seg  
 $V$  = Velocidad de sedimentación, ft/seg

Cuando una partícula de volumen y densidad conocida están presentes en un medio de densidad constante y se acelerará en un campo centrífugo, la fuerza neta sobre la partícula será igual a la fuerza de resistencia de su movimiento a través del medio, igualamos las ecuaciones anteriores:

$$F = F_0 \quad (2.6)$$

$$\frac{4}{3}\pi r_p^3 (\rho_p - \rho_m) \omega^2 r = 6\pi\mu r_p V \quad (2.7)$$

En la práctica, el balance de esta fuerza ocurre rápidamente teniendo en cuenta que las partículas sedimentan en un radio constante de giro, la velocidad de sedimentación está dada por:

$$V = \frac{dx}{dt} = \frac{2}{9} r_p^2 (\rho_p - \rho_m) \omega^2 r / \mu \quad (2.8)$$

La ecuación anterior da una idea de los factores que depende la velocidad de sedimentación de la partícula:

- Es directamente proporcional al diámetro al cuadrado de la partícula.
- Es directamente proporcional a la diferencia entre la densidad del medio y la densidad de la partícula.
- Es inversamente proporcional a la viscosidad.

La velocidad de sedimentación depende del campo centrífuga  $\omega^2 r$  y la fuerza se dirige radialmente hacia el exterior que se determina por la raíz cuadrada de la velocidad angular del rotor y la distancia radial de las partículas desde el eje de rotación.  $G = \omega^2 r$

La velocidad angular es expresada en rad/seg, una revolución del rotor es  $2\pi$  radianes, por tanto la velocidad angular debe ser expresada en la ecuación así:

$$\omega = 2\pi (R.P.M)/60 \quad (2.9)$$

El campo centrífuga  $g$  en términos de r.p.m. esta dada por:

$$G = 4\pi^2(R.P.M)^2r/3600 \quad (2.10)$$

## 2.5 INCIDENCIA DEL NUMERO DE REYNOLDS EN LAS EMULSIONES

En muchas etapas de los procesos de ingeniería, especialmente en separaciones mecánicas, intervienen el movimiento de gotas líquidas de agua a través de un fluido o fase continua. Entorno a lo mencionado se debe tener en cuenta el número de Reynolds  $Re$ , el cual con el coeficiente de arrastre  $Cd$ , definen el comportamiento del fluido y en particular, la transición de flujo laminar a flujo turbulento siendo  $Re$  función de  $Cd$ . El número de Reynolds  $Re$  se define como:

$$Re = \frac{\rho V_s d_m}{\mu} \quad (2.11)$$

$\rho$  = Densidad del líquido, lb/ft<sup>3</sup>

$V_s$  = Velocidad de sedimentación, ft/sege

$d_m$  = Diámetro de la partícula, ft

$\mu$  = Viscosidad de la fase continua, lb/ft\*seg

Para flujo laminar donde gobierna la ley de Stokes, el número adimensional  $Cd$  es:

$$Cd = \frac{24}{Re} \quad (2.12)$$

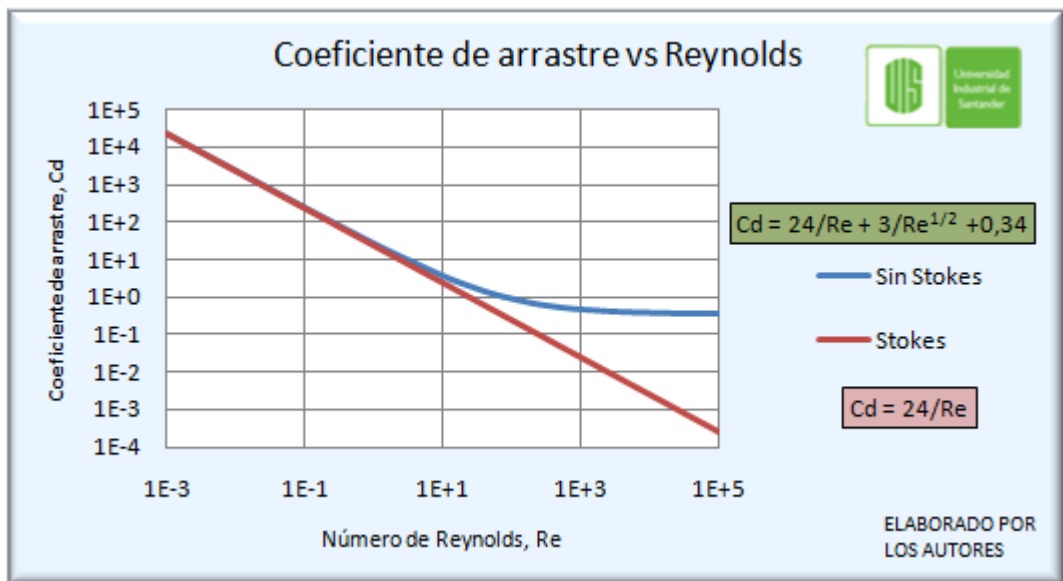
Esta ecuación solo es válida para  $Re < 2$ .

Infortunadamente, para algunos casos de diseño de facilidades de superficie la ley de Stokes no gobierna, se puede completar la fórmula para calcular Reynolds más altos y la ecuación resulta de la siguiente forma:

$$Cd = \frac{24}{Re} + \frac{3}{Re^{1/2}} + 0,34 \quad (2.13)$$

Con esta ecuación se puede generalizar la transición de flujo laminar a flujo turbulento. En la figura 13 se observa dicho comportamiento.

**Figura 13** Comparaciones de coeficientes de arrastre



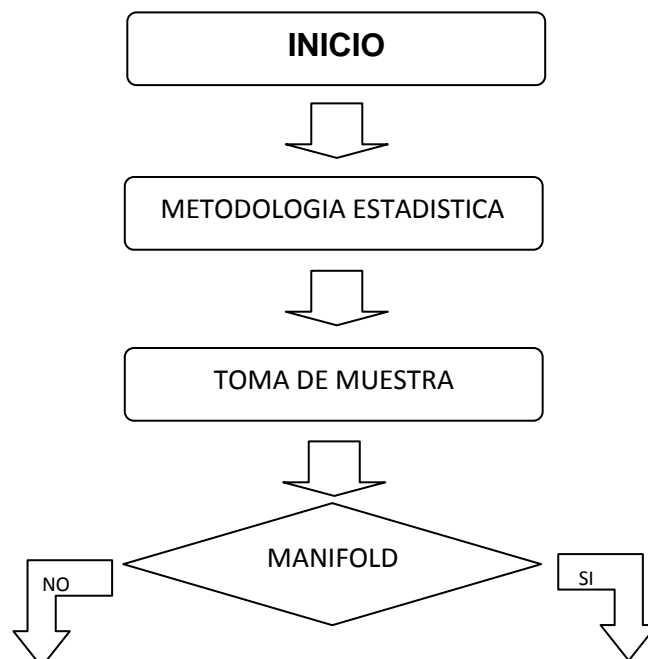
Reynolds muestra pautas para tener en cuenta y no proceder de manera errada, pues no generar la aplicación correcta puede perjudicar el buen funcionamiento del proyecto y no lograr los objetivos propuestos, el número adimensional en la fórmula de Re sirve para verificar el comportamiento de las partículas de agua a través de la fase continua.

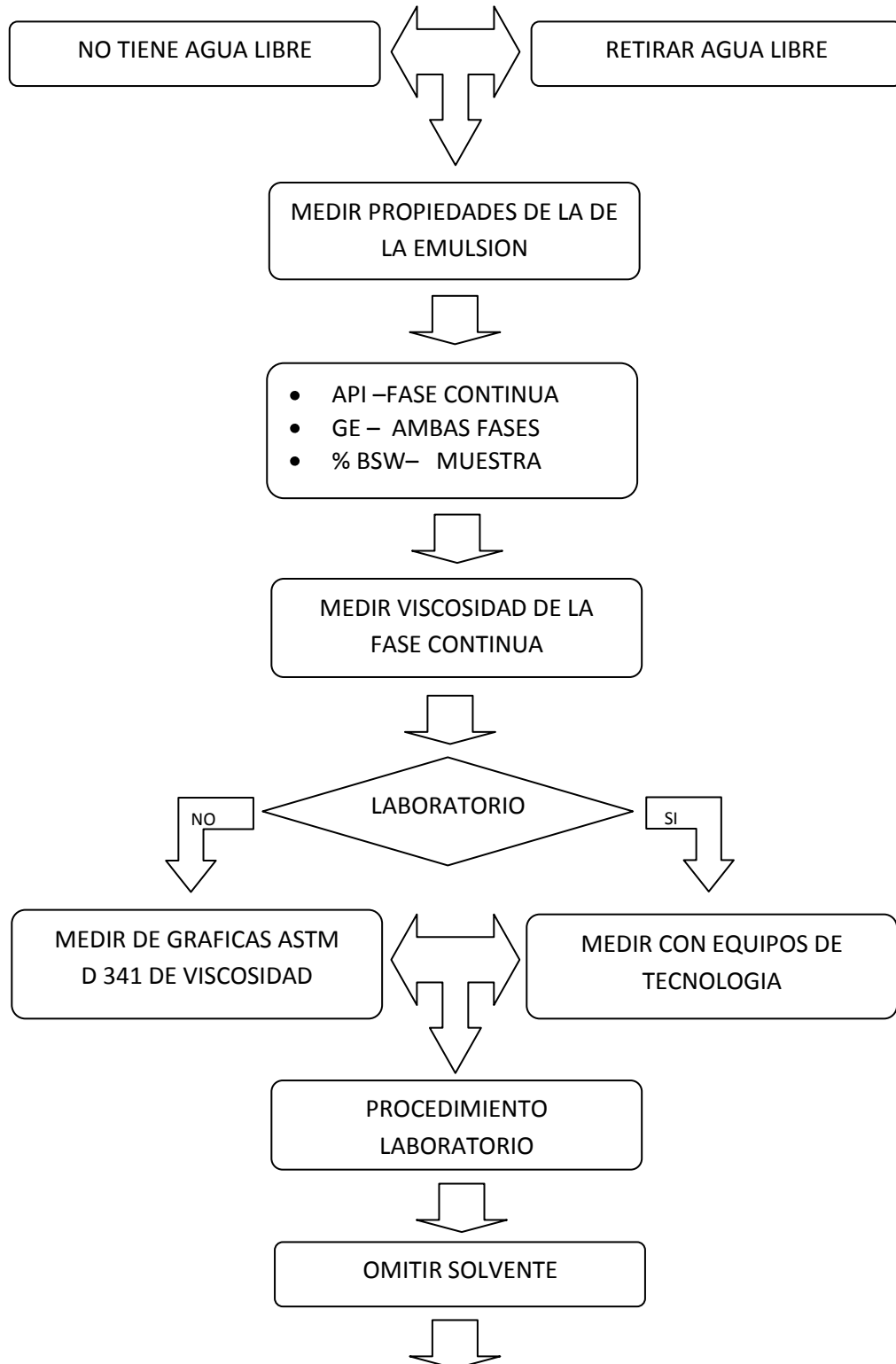
### 3. METODOLOGIA ESTADISTICA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE SEPARACION (LIQUIDO-LIQUIDO)

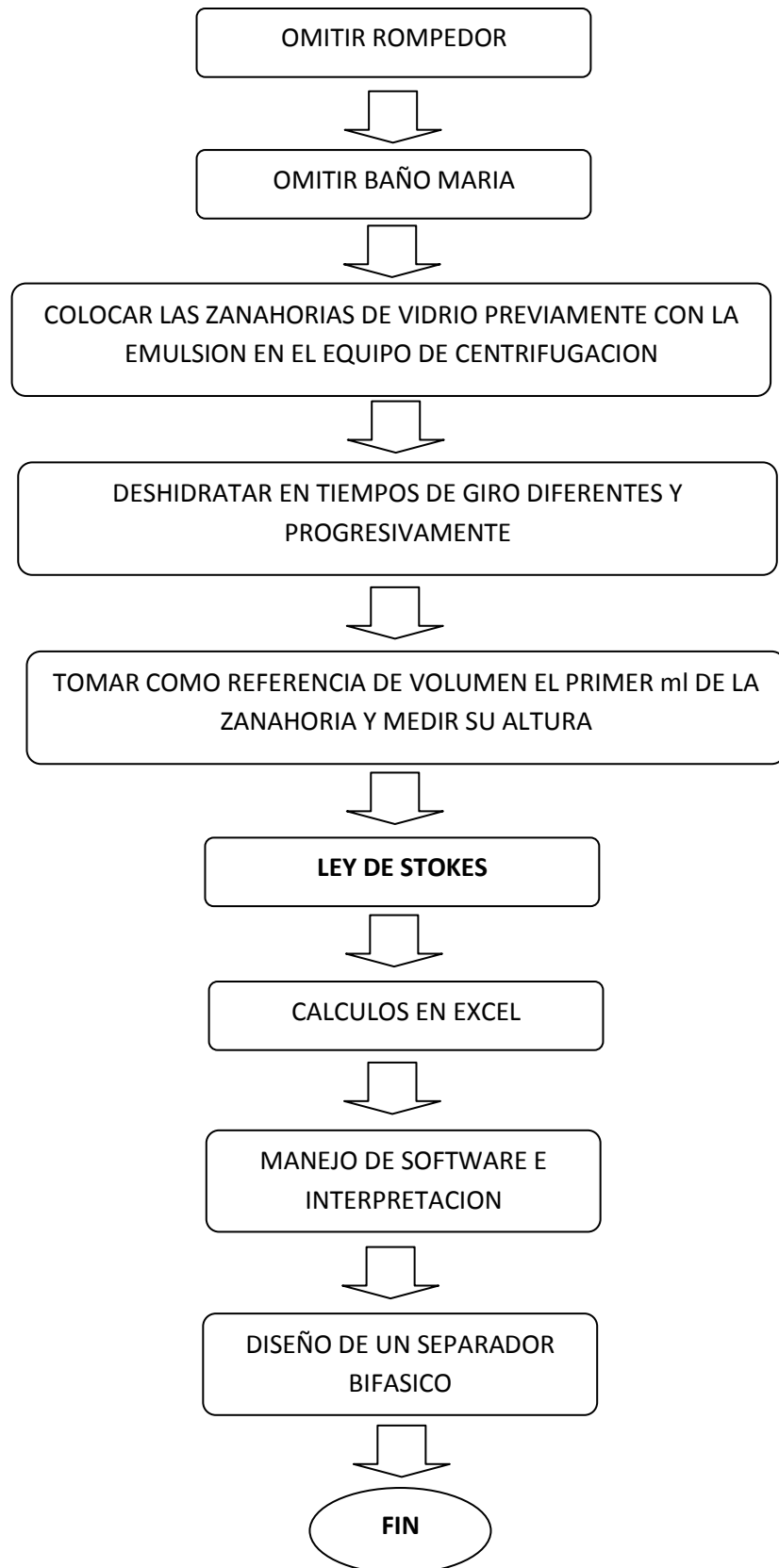
Esta metodología propone una forma de medir los diferentes tamaños de partículas de agua presentes en una emulsión directa de crudos pesados. Es relevante para conocer los diámetros de partícula, hacer una inferencia sobre estos, debido al método que se propondrá utilizará diferentes herramientas que permiten aproximar dicha medición.

A partir de los diferentes tamaños de partícula generados, se pueden expresar estadísticamente y ajustarlos a una distribución determinada, donde esta distribución permitirá hacer medidas y suposiciones con lo que se podrá definir un diámetro de partícula exacto para diseñar separadores bifásicos.

#### 3.1 DIAGRAMA DE FLUJO







## 3.2 TOMA DE MUESTRA DE EMULSION

Llevar a laboratorio una muestra de crudo significativa para su posterior evaluación dependerá del lugar de recolección de la muestra, se recomienda tomar la muestra de manifold o línea de salida de crudo del tanque Free Water Knock Out:

- En manifold: Tomar la muestra de crudo en manifold implicará en laboratorio dejar la muestra en reposo para que el agua libre presente en la muestra se sedimente, es necesario retirar el agua libre debido a que este estudio aplicara sobre crudos emulsionados.
- En tanque FREE WATER KNOW-OUT: Adquirir la muestra de crudo de este tanque o de la línea de salida de crudo del mismo permitirá llevar a laboratorio una muestra sin agua libre, y se prosigue al paso que se presenta a continuación.

## 3.3 MEDIR PROPIEDADES DE LA EMULSION

Para hacer un estudio a cualquier tipo de crudo es indispensable conocer sus propiedades, es necesario medir las siguientes propiedades:

**3.3.1 Gravedad API y gravedad específica de la fase continua (crudo).** La gravedad específica de un liquido es la relación de la densidad del liquido a 60 °F para la densidad de agua pura. La densidad API es una relación de la gravedad específica como lo muestra la siguiente ecuación:

$$^{\circ}\text{API} = (141,1/131,1 - \text{SG}) \quad (3.1)$$

Donde SG = gravedad específica (SG<sub>agua</sub> = 1).

Para especificar la gravedad específica de un líquido es la relación de la densidad del líquido sobre la densidad del agua.

$$SG = \frac{\rho_o}{\rho_w} \quad (3.2)$$

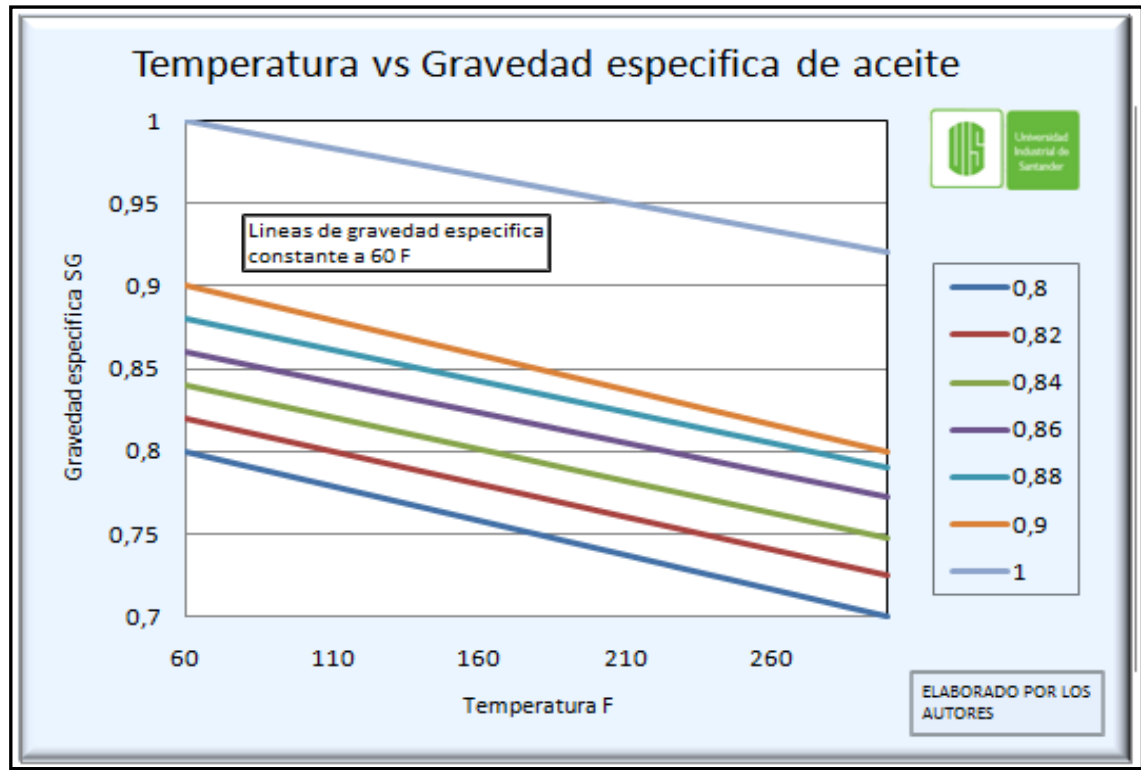
$\rho_o$  = Densidad del aceite, lb/ft<sup>3</sup>

$\rho_w$  = Densidad del agua, lb/ft<sup>3</sup>

En la mayoría de los cálculos de la gravedad específica de los líquidos es normalmente referenciada a condiciones actuales de presión y temperatura. La figura puede ser usada para aproximar, como la gravedad específica decrece cuando la temperatura aumenta, se asume que no hay cambio de fase. En la mayoría de los casos prácticos de caídas de presión asociados con las facilidades de superficie, la diferencia en la gravedad específica causada por cambios de presión no es gravemente considerada esto si no hay cambios de fase.

En la figura 14 se observan los cambios de gravedad específica tanto a medida que aumenta la temperatura.

**Figura 14** variacion de la gravedad específica con la temperatura



**3.3.2 Porcentaje total de BSW de la emulsión** Para medir el %BSW total es indispensable aplicar la norma ASTM 4008-07; la cual propone tomar una zanahoria de vidrio de 100 ml, luego llenarla con 50 % emulsión y 50 % de solvente (keroseno, etc.), seguidamente agitar la mezcla con el fin de ser homogenizada, luego aplicarle a esta mezcla 0.2 o 0.25 ml de rompedor (4 o 5 gotas), posteriormente exponerlo a Baño María de 140 F, finalmente poner la zanahoria en el quipo de centrifugación y medir el % de BSW que contiene la muestra.

Conocer el porcentaje de BSW que pueda contener la muestra o emulsión tratada, es necesario debido a que posteriormente esta metodología propone deshidratar un crudo en diferentes tiempos de forma progresiva y es indispensable saber a qué tiempo o intervalo de tiempo se debe detener la

prueba. El tiempo para detener la prueba se conoce cuando en la zanahoria se observe el porcentaje de BSW medido con anterioridad.

**3.3.3 Viscosidad** la viscosidad de la fase continua (crudo). Inicialmente se recomienda medir esta propiedad a temperatura 60 F porque su tratamiento se hará a condiciones de laboratorio, que en general se encontrará a dicha temperatura. Es indispensable hacer referencia que esta variable es de gran importancia, debido a que influye a que la cantidad de BSW en una muestra aumente o disminuya dependiendo la viscosidad del crudo. Lo cual a medida que la viscosidad de un crudo aumente contendrá mayor cantidad de agua en emulsión y de ahí la estabilidad y diámetros de partículas de gota de agua muy pequeños generando por consiguiente sistemas de tratamiento de superficie más grandes y costosos.

Tener y conocer las curvas de viscosidad del crudo que se está estudiando que por lo general todos los campos tienen definidas y medidas estas curvas, favorece al diseño del equipo separador o tratador, normalmente el rango de temperaturas es entre 100 y 160 F. pero en tratamientos de crudos pesados la temperatura más alta puede ser como de 300 F. Por esta razón es indispensable tener dichas curvas, ya que el diseño de un separador debe hacerse a diferentes temperaturas teniendo en cuenta la temperatura a la cual se operara dicho tanque.

La ecuación con más importancia para el desarrollo de dichas curvas fue desarrollada sobre un estudio emperico hecho a 460 crudos diferentes, entre 16 y 58 grados API a temperaturas entre 70 y 295 ° F. a falta de los datos de laboratorio, las correlaciones existentes que se relacionan con la viscosidad y la temperatura, dada la densidad API del crudo fue desarrollada por Beggs y Robinson:

$$\mu = 10^x - 1 \quad (3.3)$$

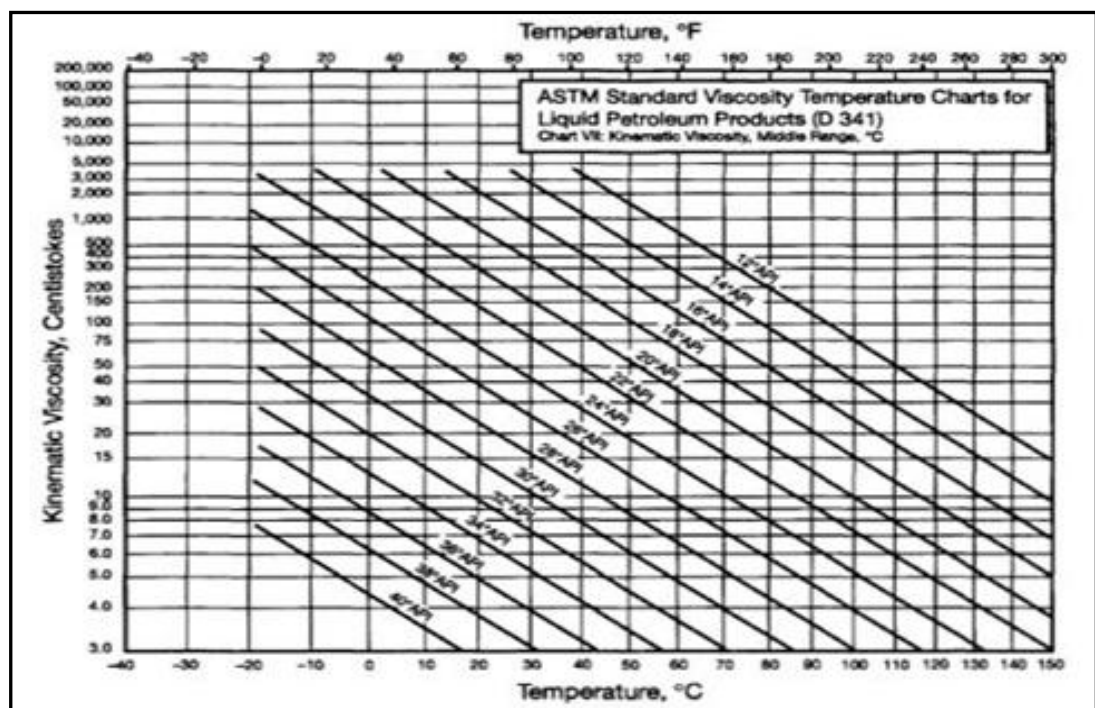
$\mu$  = Viscosidad del aceite, cp

T = Temperatura del aceite, °F

X =  $Y (T)^{-1,163}$

En la siguiente figura 15 hay una representación de otra correlación elaborada con la norma ASTM D 341 que muestra a diferentes temperaturas y densidades API, la viscosidad cinemática de la emulsión que se estudia.

**Figura 15** Viscosidades cinemáticas a diferentes temperaturas.



La viscosidad del agua producida depende de la cantidad de sólidos disueltos en el agua, así como la temperatura, pero para la mayoría de casos prácticos que varía desde 1,5 hasta 2 cp a 50°F, 0,7 a 1 cp a 100 °F, y 0,4 a 0,6 a 150°F.

Cuando una emulsión de aceite y agua se forma, la viscosidad de la mezcla puede ser sustancialmente más alta que cualquier viscosidad del aceite o del agua tomada en sí mismas. El petróleo y el agua producida se mezclan con fuerza mano, y la viscosidad se midió para diversos porcentajes de agua. Para el corte de agua del 70%, la emulsión comenzó a romperse antes de leerla viscosidad se podría hacer, y por cortes de agua más grande que este, el aceite y el agua comenzó a separarse tan pronto como la mezcla se detuvo. Por lo tanto, en el corte de agua de aproximadamente 70%, aparece como si el petróleo deja de ser la fase continua y el agua se convierte en continuo. Los datos de laboratorio trazado están de acuerdo en estrecha colaboración con la ecuación modificada de Vands y de asumieron un punto de rompimiento del 70%. Esta ecuación permite determinar la viscosidad efectiva de una mezcla aceite-agua y está escrito en la forma.

El conjunto de datos de los que procede esta relación incluye un rango entre 16 y 58 ° API 70 a 295 F.

### **3.4 PROCEDIMIENTO EN LABORATORIO**

Se prosigue a llenar una zanahoria de vidrio de 100 mililitros de 50% solvente y 50% muestra, se prosigue agitar esta mezcla teniendo previamente un tapón en la boquilla de la zanahoria con el fin de homogenizar la mezcla.

- Es necesario omitir el solvente debido a que este genera el cambio de algunas propiedades de la muestra. Evidentemente la viscosidad de la muestra aumentará al ser mezclado con el solvente, y teniendo en cuenta esta consideración el tamaño de la partícula inicial o distribución de agua presente en la muestra podría alterarse o depositarse rápidamente, lo que conllevaría hacer una medición o deshidratación no representativa.

- Aplicar rompedor a la muestra afecta la tensión interfacial de las fases y es necesario omitir el rompedor ya que este favorece la coalescencia de las partículas de agua y su posterior sedimentación.
- Llevar la zanahoria de vidrio y su contenido, la muestra, a un baño maría implicará la reducción de la viscosidad debido al aumento de la temperatura. Deberá omitirse este procedimiento ya que durante el baño maría elevara la temperatura de la muestra disminuyendo su viscosidad y permitirá la sedimentación de las partículas de agua generado por el cambio a la resistencia que el fluido ejerce sobre las partículas para que estas no se depositen.

### 3.5 EQUIPO DE CENTRIFUGACION

Utilizar el equipo de fuerza centrifuga se hace necesario ya que este ayuda a simular la sedimentación de partículas de agua en un tiempo relativamente corto, teniendo en cuenta que este tiempo puede ser mínimo 24 horas.

**3.5.1 Procedimiento básico en equipo de centrifugación** Es primordial colocar en el equipo muestras o zanahorias de vidrio en forma par; esto para mantener el equipo nivelado y así evitar romper las zanahorias mientras se está corriendo la prueba. De esta manera, también facilitará o medirá el grado de confiabilidad ya que se evaluaría las muestras teniendo en cuenta la repetitividad en términos estadísticos.

La velocidad de operación del equipo se debe ser alta por ser crudos pesados por lo tanto se graduará a 1600 revoluciones por minuto (RPM) según lo sugerido por la norma ASTM y lo adoptado en los diferentes laboratorios donde se hace una prueba de BSW utilizando un equipo de centrifugación.

1. Tiempo de medición ó tiempo de giro: de manera lógica la sedimentación de partículas empezaría desde los primeros segundos en que el equipo se encuentre operando o en movimiento; intuitivamente podría generarse tiempos de giro iguales, es decir, tomar como referencia un patrón de medida del tiempo, por ejemplo tiempos de giro de 30 segundos hasta q la sedimentación sea total, sin embargo la deshidratación deberá hacerse con tiempos de giro progresivamente teniendo en cuenta que este tipo de prueba arroja en los primeros segundos sedimentación de BSW y cada vez el tiempo será mayor para que siga ocurriendo sedimentación. Posteriormente en el desarrollo de la metodología veremos los tiempos sugeridos para correr la prueba.
2. Cantidad de BSW sedimentado: siendo la unidad de medida de una zanahoria de vidrio los mililitros, se tendrá en cuenta el tiempo de llenado de 1 ml, el cual debe ser el primer mililitro indicado en la zanahoria (nota: las zanahorias de vidrio de 100 ml podemos encontrarlas de diferentes tamaños).
3. Altura del primer mililitro de la zanahoria. Esta altura muestra en detalle unidades más pequeñas a un mililitro, la finalidad de aprovechar las diferentes medidas en este mililitro es debido a que en los mililitros superiores donde no puede verse las pequeñas cantidades de sedimentación podamos hacer una aproximación de la cantidad de BSW que se sedimenta que en ocasiones no podrá verse a simple vista.
4. Velocidad de sedimentación: Esta variable nos permite inducir el tamaño de partícula presente en el crudo. Medir el tamaño de partícula utilizando la velocidad de sedimentación con la ayuda del equipo de centrifugación se podrá inferir el tamaño de partícula.

La altura del primer mililitro es usado para tener como referencia medir la velocidad de sedimentación de las partículas, y deberá manipularse conforme se nombra en el siguiente ítem (paso 5).

### 3.6 LEY DE STOKES

Este principio es utilizado cuando se tiene una información previa del fluido; propiedades como la viscosidad ya que esta permite que las partículas viajen a través de este en flujo laminar

La ecuación de Stokes es utilizada despejando la variable que se quiere calcular, así:

$$d^2 = \frac{18*v_s*\mu}{(\rho_w - \rho_o)*\omega^2*r} \quad (3.4)$$

Donde:

$d$  = Diámetro de partícula, ft.

$v_s$  = Velocidad de sedimentación de la partícula, ft/Seg.

$\mu$  = Viscosidad de la fase continua, cp.

$\omega$  = Velocidad angular del equipo de centrifugación, ft/seg.

$r$  = Radio de giro, ft

$\rho_w$  = Densidad específica del agua, lb/ft<sup>3</sup>.

$\rho_o$  = Densidad específica del aceite, lb/ft<sup>3</sup>.

#### 3.6.1 Varias conclusiones para usar la ley de Stokes.

- Cuando el tamaño de partícula de agua es mayor, mayor será su cuadrado generando velocidades de asentamiento más rápidas entonces menos

tiempo tomanan en sedimentarse en el fondo del recipiente, por lo tanto es más fácil tratar el aceite.

- Cuanto mayor sea la diferencia de densidad entre la gota de agua y la fase de aceite, mayor será la velocidad de asentamiento. Por lo tanto, mas ligero es el crudo y será más fácil su tratamiento. Si la densidad API del crudo es 10 y el agua es fresca, la velocidad de sedimentación es cero, y no habrá diferencia de densidades.
- La mayor temperatura, disminuye la viscosidad del aceite disminuye y aumentara la velocidad de sedimentación aumentara. Esto hará más fácil el tratamiento del aceite a altas temperaturas que bajas temperaturas. (asumiendo un pequeño efecto en la diferencia densidades debido al aumento de la temperatura.

### 3.7 CALCULOS EN EXCEL

Con el fin de facilitar el manejo de datos y cálculos es recomendable utilizar una herramienta que permita manipular de manera sencilla y explicita los valores que se manipulen como resultado de mediciones en el equipo de centrifugación. A continuación se presenta un modelo guía para el manejo de datos y cálculos:

**Tabla 2** Calculo en Excel

1	2	3	4	5	6	7	8	9
15	15	0.05	0.1175	0.0078	$d^2$	$\sqrt{d}$	$7 / 1 \times 10^{-6}$	% BSW
15	30	0.1	2.35	0.078	$d^2$	$\sqrt{d}$	$7 / 1 \times 10^{-6}$	% BSW

**PASO 1.  $t_{seg}$**

Expresa el tiempo de giro en la centrifuga, se mide en segundos (s), ejemplo 15s – 15s.

**PASO 2.  $t_{seg}$  acumulado**

Es el tiempo acumulado de la prueba expresada en segundos, ejemplo 15s – 30s.

**PASO 3. ml.**

Cantidad de agua sedimentada en mililitros por cada tiempo de giro, ejemplo 0.05ml – 0.1ml.

**PASO 4. h-pies.**

Es la cantidad de mililitros expresados en metros haciendo referencia con el tiempo de llenado del primer ml de la zanahoria de vidrio:

$$1 \text{ ml} = 2.35 \text{ cm}$$

$$1 \text{ pie} = 30.48 \text{ cm}$$

Este factor sirve de conversión con el fin de expresar el paso 5.

**PASO 5:  $V_s$**

Expresa la velocidad de sedimentación de la partícula en pie por segundo (ft/s), y es obtenida dividiendo el paso 4 entre el paso 2 (4/2).

**PASO 6:  $d^2$**

Se calcula teniendo en cuenta la ecuación de Stokes y su medida es  $ft^2$ .

**PASO 7: d**

Es la raíz cuadrada del paso 6, mide el diámetro de partícula en pies.

### **PASO 8: d**

Es la unidad de medida del diámetro de partícula de agua emulsionada en el crudo expresado en pies, sin embargo esta variable es indispensable expresarla en micras.

Es conveniente tener en cuenta el siguiente factor de conversión:

$$1 \text{ } \mu\text{m} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Los datos de esta columna deben ser interpretados con un programa de simulación Montecarlo.

### **PASO 9: % BSW**

Se calcula con el fin de comparar diámetro de partícula sedimentado y su equivalencia en porcentaje de agua sedimentado. Se tiene en cuenta la columna 2 para este paso.

Ejemplo, Por simple regla de tres:

$$15 \times (100\% / 30)$$

Los datos en esta columna deberán ser interpolados ya que el diámetro de partícula calculado cambiará en cierto modo cuando los datos sean sometidos a la simulación. Deberá realizarse con el fin de comparar cantidad de BSW sedimentado con los percentil de diámetro de partícula.

### 3.8 AJUSTE ESTADISTICO

Según la experiencia estadística todo proceso en la naturaleza obedece estadísticamente a distribuciones log-normal. Hacer un ajuste estadístico a una serie de datos obtenidos o medidos por medio de una prueba que simule un proceso natural como es el caso de la sedimentación de agua en aceite se tendrá un grado de confiabilidad o referencia a que distribución estadística se debe hacer una prueba de bondad de ajuste.

Una prueba de bondad de ajuste es aplicada donde se estudia a un único grupo o población. El propósito de esta prueba es averiguar si existen diferencias estadísticamente significativas entre la distribución medida llamada ( $F_o$ ) y la distribución esperada llamada ( $F_e$ ), es decir, medir el grado de confiabilidad al cual se ajusta la población medida.

Una prueba de bondad de ajuste plantea dos hipótesis estadísticas, la hipótesis estadística nula ( $H_o$ ) y la hipótesis estadística alterna ( $H_a$ ) donde:

a)  $H_o$ , propone que la distribución medida u observada es igual a una distribución estadística a la cual se ajustan los valores medidos. Donde:

$$H_o: F_o = F_e$$

Pero la hipótesis será rechazada cuando los valores de  $F_o$  son mayores a los valores críticos de  $F_e$ , y no es rechazada cuando los valores medidos de  $F_o$  son igual o menores a  $F_e$  y se afirma que las distribuciones son semejantes.

b)  $H_a$ , propone la diferencia entre  $F_o$  y  $F_e$ , y se hace cuando la hipótesis nula es rechazada, pero ésta ratifica que la diferencia de todos modos se asimila a la distribución a la cual se está haciendo el ajuste, en tal caso es aceptada la hipótesis y la prueba de bondad de ajuste resulta acorde a lo que quiere plantearse.

Ha:  $F_o \neq F_e$

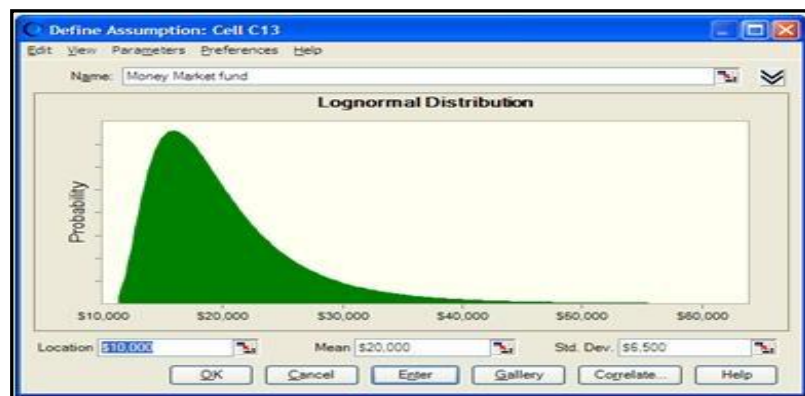
### 3.9 MANEJO E INTERPRETACION DE SOFTWARE (CRYSTAL BALL)

Utilizar un software de Simulación Montecarlo para facilitar la manipulación e interpretación de los datos obtenidos, se hace indispensable cuando la información a manipular es extensa.

Crystal Ball es la forma más fácil de realizar simulaciones Monte Carlo en sus propias hojas de cálculo. Crystal Ball automáticamente calcula miles de diferentes casos de "y que pasaría si...", ahorrando los resultados de cada cálculo como escenarios individuales. El análisis de estos escenarios le revelará a usted el rango de ocurrencias posibles, la probabilidad de que estas pasen, cual input tiene mayor efecto en su modelo donde debería enfocar su trabajo.

Crystal Ball es para planeadores estratégicos, analistas financieros, ingenieros, empresarios, administradores de mercadeo, consultantes, profesionales de Six Sigma y cualquiera que utilice hojas de cálculo para predecir resultados inciertos. En las mejores escuelas de negociantes y universidades de EEUU se enseña cómo usar Crystal Ball.

**Figura 16** Descripción Crystal Ball



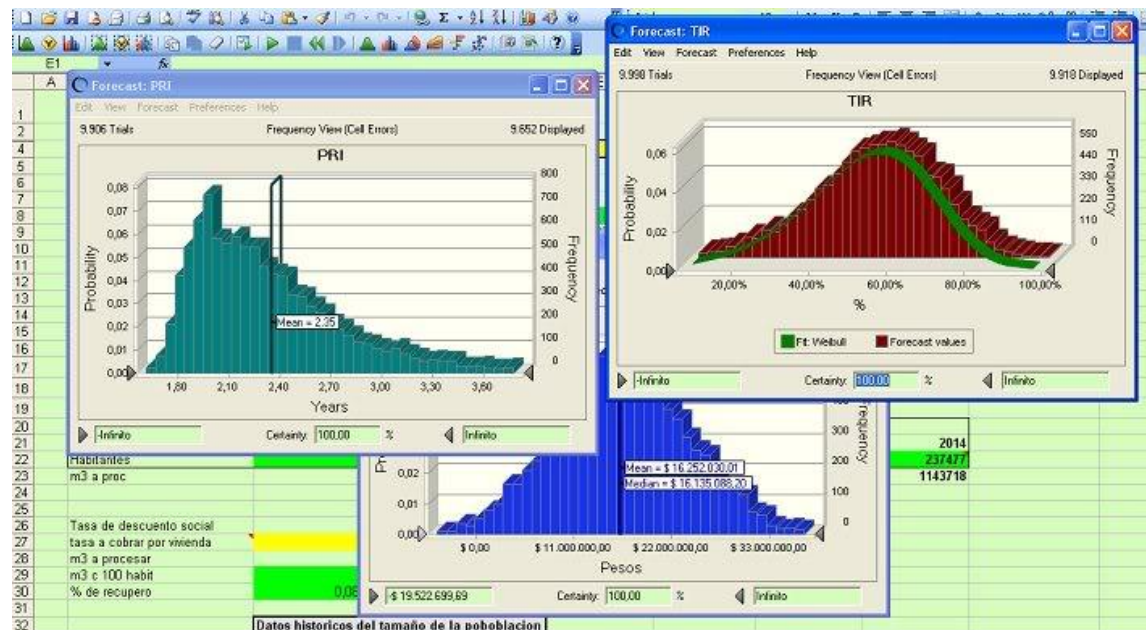
Crystal Ball incluye Simulación de Monte Carlo Calcula múltiples escenarios de un modelo de hoja de cálculo automáticamente. Libera al usuario de las restricciones propias de las estimaciones y de los valores puntuales.

También Ofrece una interfaz intuitiva para seleccionar las variables de entrada del modelo. Incluye 16 distribuciones discretas y continuas, así como distribuciones propias. Simplifica la cuantificación del riesgo, sin que sea necesario introducir la fórmula de la distribución en Excel. Cree distribuciones predefinidas, modifíquelas y organícelas creando sus propias categorías. Puede diseñar una biblioteca de distribuciones propia, organizada en categorías. Reutilice las distribuciones en varios proyectos. Publique y comparta categoría entre varios usuarios. Trabaje como un equipo compartiendo modelos y datos para acabar antes el trabajo.

Define especificaciones (Inferior, Superior y Deseada) en sus predicciones, calcule las métricas de capacidad y observe los resultados de la simulación y las métricas juntas en una gráfica dividida. Con las métricas de capacidad de Crystal Ball se simplifica el flujo de trabajo y se integra la simulación en su metodología Six Sigma y de calidad.

Muestre gráficamente los resultados de la simulación junto con las estadísticas. Observe y analice miles de posibles resultados gracias a las gráficas interactivas.

**Figura 17** funciones de Crystal Ball



Las pruebas de bondad de ajuste que previamente se nombraron con el fin de ajustar a una distribución estadística ya conocida la información que se medirá o manipulará; dichos programas facilitan hacer este tipo de prueba y arrojan resultados conforme a qué tipo de distribución se podrá ajustar la información que se esté manipulando. De igual manera, gráficamente detallan la posibilidad de ajustarse a todas las distribuciones estadísticas existentes, sin embargo, esto es con el fin de dar una medida de la certeza por la cual la prueba de bondad arroja la posibilidad de una única aproximación real a un tipo de distribución estadística.

### 3.10 DISEÑO DE UN SEPARADOR BIFASICO

Una de las funciones del ingeniero de petróleos tiene que ver con lo relativo al diseño de todos los elementos que involucran una facilidad de superficie, con ello a involucrar variables que afecten este tipo de diseños los cuales generan elementos más precisos y confiables en la industria.

Este proyecto tiene como propósito crear diseños de tanques de lavado (Gun Barrel) más precisos los cuales sedimenten en su totalidad el porcentaje de agua que se encuentra emulsionada en un crudo pesado, pero para ello se deben tener en cuenta varias variables directas e indirectas diferentes al tamaño de partícula para consolidar un diseño preciso y confiable como los son:

- Viscosidad
- Caudal de aceite y agua
- Temperatura de operación
- Gravedad API
- Densidad específica de las dos fases

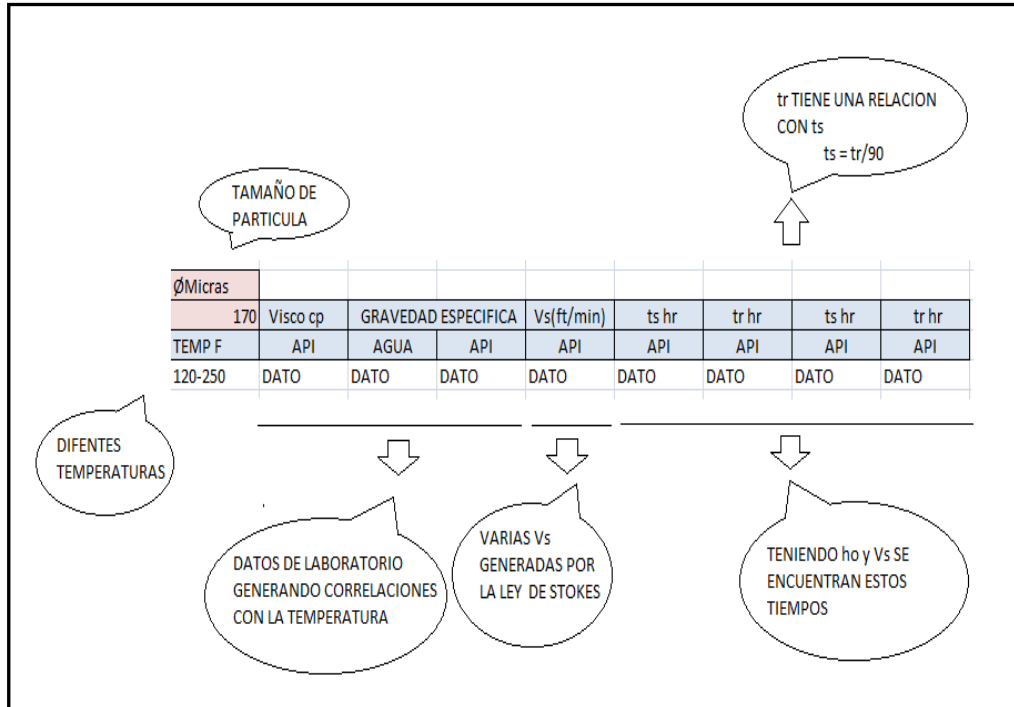
Al tener estos datos confiablemente hallados se puede lograr un diseño óptimo pero antes, teniendo la distribución del tamaño de partícula para crudo pesado, con ello se puede lograr un diseño no solo óptimo sino más preciso en su función de separación.

Luego generar una tabulación donde se encuentren los siguientes parámetros para pasar a la otra etapa de la metodología:

- a. Temperatura (F).
- b. Viscosidad de la emulsión (cp).
- c. Densidad específica de las dos fases (agua y aceite).
- d. Velocidad de sedimentación ft/min.
- e. Tiempo de sedimentación ft/min.
- f. Tiempo de sedimentación hr.
- g. Tiempo de residencia hr.
- h. Diámetro de partícula hallado con la estadística

En la grafica 18 se muestra un ejemplo de cómo se debe elaborar:

**Figura 18** propiedades de la emulsión respecto a la temperatura



Con esta tabulación se podrán encontrar diferentes opciones para empezar a diseñar y lograr dimensiones opcionales que cumplan de forma precisa con la separación requerida en el **ANEXO A** se podrá encontrar detalladamente este tipo de tabulación.

### 3.10.1 Procedimiento de dimensionamiento de un separador

Para el dimensionamiento de un separador bifásico se debe tener en cuenta los siguientes parámetros con los cuales se podrán encontrar las dimensiones apropiadas de un separador:

1. El primer paso en el dimensionamiento de un separador vertical es establecer las bases de diseño. Esto incluye especificaciones de los

caudales mínimos y máximos, temperaturas y presión de operación, tamaño de partícula para ser removida, etc.

2. Calcule el diámetro mínimo para los requerimientos de asentamiento de la gota de agua a través de la fase de aceite, utilice el **dm**, diámetro más pequeña de la gota de agua dispersa en aceite hallada con la metodología propuesta.

$$dmin^2 = 7734 \frac{Qo\mu}{\Delta(SG)dm_w} \quad (3.5)$$

$dm$  = Diámetro mínimo, pulgadas

$Qo$  = caudal de aceite, BBPD

$\mu$  =viscosidad, cp

$\Delta(SG)$  = diferencias de gravedades especificas

$dm_w$  = diámetro de la gota de liquido, micrones

NOTA: esta ecuación se generó **ANEXO B** con los conceptos de diseño tanques de la norma API 650, pero si se desea hacer otro tipo de diseño se aconseja conocer los principios de diseño de los sistemas de separación líquido-líquido, con estos principios se logrará una ecuación acorde al diseño que se desee a elaborar.

3. Seleccione el diámetro calculado.
4. Determine los tiempos de residencia tanto del aceite y de agua, y calcule el espesor de colchón de aceite en pulgadas. Altura de la columna de agua en pulgadas para varios diámetros mayores al diámetro calculado escogido en el punto 3

$$h_o + h_w = \frac{TR_o Q_o + TR_w Q_w}{0.12d^2} \quad (3.6)$$

5. Determine la longitud costura-costura ( $L_{s-s}$ )

$$L_s - s = \frac{ho+hw+76}{12} \quad (\text{Para diámetros mayores a 36 pulgadas}) \quad (3.7)$$

$$L_s - s = \frac{ho+hw+d+40}{12} \quad (\text{Para diámetros menores a 36 pulgadas}) \quad (3.8)$$

6. Repita los pasos 4 y 5.

7. Tabule y grafique.

8. En esta etapa de la metodología se puede cambiar factores de diseño gracias a la tabulación mencionada en la grafica 4, con esta tabla se podrá encontrar los parámetros según la temperatura (puede ser desde 60 a 250 F) de operación y ajustar un diseño ideal acogiéndose a los datos de laboratorio.

La temperatura juega un rol muy importante en esta parte de la metodología porque esta genera drásticos cambios en el diseño, entonces se debe aprovechar esta influencia para optimizar dicho diseño. Un aumento en la temperatura genera los siguientes cambios:

**Tabla 3** propiedades de la emulsión con aumento en temperatura

Viscosidad de la fase continua	Disminución.
Gravedades específicas de las dos fases	Disminución.
Tiempos de residencia	Disminución.
Velocidad de sedimentación	Aumento.

Observar detalladamente estos cambios se puede decir que las dimensiones del tanque tienden a ser menores con una temperatura alta.

Pero se debe tener en cuenta el caudal de producción de inicio para diseñar y no cometer errores de diseño porque se puede sobredimensionar y generar errores drásticos en el diseño, esto se verifica con el volumen de diseño con las dimensiones encontradas y observar si cumple con esta especificación teniendo en cuenta la relación de esbeltez que es de vital importancia.

9. Compute la relación de esbeltez

$$12L_{s-s}/d \quad (3.9)$$

10. Seleccione el tamaño del recipiente (d y  $L_{s-s}$ ) que involucre la relación de esbeltez que este en un rango de 0,5 a 1,1 (norma API 650).

Nota: todas las ecuaciones para el diseño se encuentra más detalladamente en el libro SURFACE PRODUCTION OPERATIONS. Ken Arnold.

11. Luego de conocer las velocidades de sedimentación se le harán ajustes estadísticos con el software Crystal Ball para ajustar los tiempos de sedimentación y retención.

12. Luego de ajustar se diseñara con estos datos ajustados y conseguir un optimo diseño con márgenes de error mínimos.

Luego de conocer estos conceptos se procede a diseñar siguiendo los pasos especificados por la metodología propuesta.

## 4. APLICACIÓN Y RESULTADOS DE LA METODOLOGIA

En esta parte del proyecto se pondrán en práctica todos los pasos de la metodología propuesta, iniciando con un crudo de 22 API tomado de un campo en el centro del magdalena de Colombia y analizado en el laboratorio con todos los respectivos procedimientos requeridos para la muestra. A esta muestra se le harán los respectivos análisis y luego de extraer los datos necesarios, utilizar los conocimientos de estadística fundamentados para elaborar ajustes en los datos y llevarlos al diseño de tal manera poder tomar la decisión de las dimensiones del diseño del sistema de separación que se procederá a diseñar.

En este tipo de experimento se trato la muestra con mucho cuidado para no tener cambios en la misma y no cometer errores a la hora de calcular los datos necesarios para el diseño correcto.

### 4.1 TOMA DE LA MUESTRA EN MANIFOLD:

Esta muestra debe ser tratada como se propuso en el capítulo 3, siguiendo los pasos de toma de muestra estipulada por el campo en el cual se tomo la muestra recibiendo asesoría de los técnicos del mismo.

**4.1.1 Cantidad de muestra** Se vierte el crudo en un vaso de precipitado de 1000 ml (figura).

**Figura 19** Muestra de aceite, 1000ml



**4.1.2 Retiro de agua libre** Para retirar el agua libre se llena una manguera pequeña de agua, se tapa un extremo de la manguera sin dejar salir el agua y el otro extremo se introduce hasta el fondo del vaso de precipitado. Tener en cuenta que el vaso de precipitado debe estar a un nivel más alto de la boquilla de la manguera que está tapada con el fin que el agua libre sea retirada por gravedad.

**4.1.3 Medida de propiedades** La siguiente tabla muestra las propiedades que se deben medir a una emulsión tipo W/O. Se deben medir a una temperatura de 60 F para tener enlace con las correlaciones de Beggs y Robinson y hacer comparaciones con las mediciones.

**Tabla 4** Propiedades medidas

PROPIEDAD	MEDIDA
API	FASE CONTINUA
API	EMULSION
VISCOSIDAD	FASE CONTINUA
GRAVEDAD ESPECIFICA	FASE CONTINUA
GRAVEDAD ESPECIFICA	FASE DISPERSA
% BSW	MUESTRA- SUGIERE SEGUIR RIGUROSAMENTE LA NORMA ASTM

**4.1.4 Muestra sin agua libre** Luego de tener la muestra sin agua libre se prosigue a los pasos siguientes

- Se prepara una zanahoria de vidrio de 100 ml.
- Se vierte 100 ml de crudo en la zanahoria.

**4.1.5 Omisión Solvente, Rompedor y baño María** Como ya se había propuesto en el capítulo 3, no se deben tener en cuenta estos procedimientos para hallar la cantidad de BSW de la emulsión debido a la sedimentación casi inmediata de las partículas de agua, por consiguiente no permitirá generar una distribución estadística.

**Figura 20** Agregando solvente



**Figura 21** Agregando rompedor



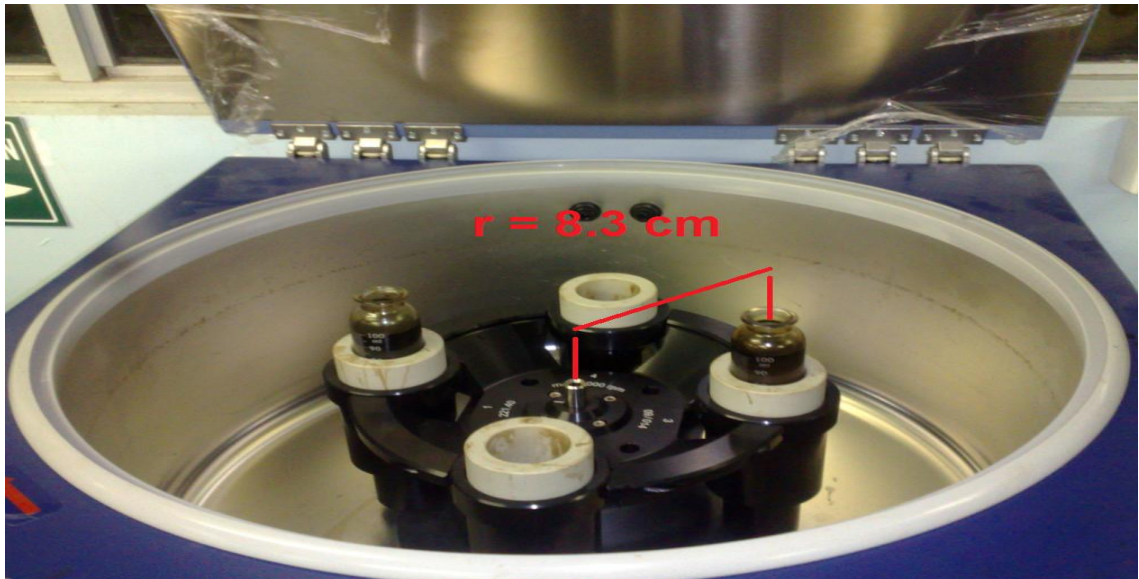
**Figura 22** Manipulación de zanahorias baño María.



**4.1.6 Equipo de Centrifugación** Algunos equipos de operación centrífuga tienen un sistema para graduar la temperatura al momento de tapar el equipo. Sin embargo, se debe operar el equipo a temperatura ambiente.

La figura 23 muestra el radio medido desde el centro del rotor al centro superior de la zanahoria. El radio debe tenerse en cuenta para los respectivos cálculos ya que este varía entre los diferentes tipos de equipos de fuerza centrífuga.

**Figura 23** Radio de la centrifuga



#### 4.2 CALCULO DE DIÁMETRO DE PARTICULA DE AGUA

La ley de Stokes describe:

$$d^2 = \frac{18 \cdot v_s \cdot \mu}{(\rho_w - \rho_o) \cdot \omega^2 \cdot r} \quad (4.1)$$

Donde:

$d$  = Diámetro de partícula, ft.

$v_s$  = Velocidad de sedimentación de la partícula, ft/Seg.

$\mu$  = Viscosidad de la fase continua, lb/ft\*s.

$\omega$  = Velocidad angular del equipo de centrifugación, ft/seg<sup>2</sup>.

$r$  = Radio de giro, ft

$\rho_w$  = Densidad del agua, lb/ft<sup>3</sup>.

$$\rho_o = \text{Densidad del aceite, lb/ft}^3.$$

Con esta aplicación derivada de la ley de Stokes demostrada en el capítulo 2 se puede hacer inferencia del el tamaño de partícula más apropiado para generar el diseño de un separador bifásico con las perspectivas que se pretenden.

Se procede a generar la hoja de cálculo en Excel para encontrar la distribución estadística del tamaño de partícula con su respectivo % BSW sedimentado, como lo muestra la tabla 5.

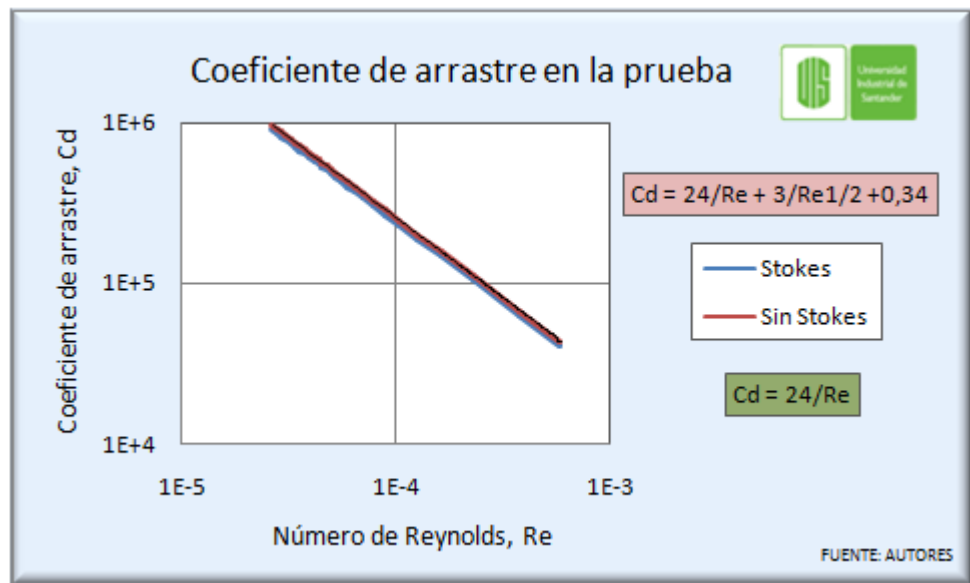
**Tabla 5** Calculo de distribución de diámetro de partícula.

tseg	Acumulado		Sedimentado		Vs ft/s	d2	d ft	d micras	%bsw emulsion
	tseg acumulado	ml	h-ft	Intervalo					
120	120	10	0,770997375	10	0,00642498	2,38052E-06	0,00154289	470,274377	29,3255132
120	240	15	1,156496063	5	0,00481873	1,78539E-06	0,00133619	407,269558	29,2395146
120	360	16	1,233595801	1	0,00342666	1,26961E-06	0,00112677	343,439846	28,9822755
120	480	17	1,310695538	1	0,00273062	1,01172E-06	0,00100584	306,581385	28,5573154
120	600	18	1,387795276	1	0,00231299	8,56989E-07	0,00092574	282,164626	27,9710949
120	720	19	1,464895013	1	0,00203458	7,53833E-07	0,00086824	264,638175	27,0688015
120	840	20	1,541994751	1	0,00183571	6,8015E-07	0,00082471	251,372228	25,7987111
120	960	21	1,619094488	1	0,00168656	6,24888E-07	0,0007905	240,94392	24,2099342
120	1080	22	1,696194226	1	0,00157055	5,81906E-07	0,00076283	232,509875	22,3640154
120	1200	23	1,773293963	1	0,00147774	5,47521E-07	0,00073995	225,535668	20,3309231
120	1320	24	1,850393701	1	0,00140181	5,19387E-07	0,00072069	219,664864	17,8864426
120	1440	25	1,927493438	1	0,00133854	4,95943E-07	0,00070423	214,649904	15,2113442
120	1560	26	2,004593176	1	0,001285	4,76105E-07	0,00069	210,313095	12,4902533
120	1680	27	2,081692913	1	0,0012391	4,59101E-07	0,00067757	206,52336	9,88964337
120	1800	28	2,158792651	1	0,00119933	4,44365E-07	0,00066661	203,181753	7,54049054
120	1920	29	2,235892388	1	0,00116453	4,3147E-07	0,00065686	200,212102	5,52821887
120	2040	30	2,312992126	1	0,00113382	4,20093E-07	0,00064815	197,554753	3,89082853
120	2160	31	2,390091864	1	0,00110652	4,09979E-07	0,0006403	195,162293	2,6243125
120	2280	31,5	2,428641732	0,5	0,00106519	3,94666E-07	0,00062822	191,482811	1,69310484
120	2400	32	2,467191601	0,5	0,001028	3,80884E-07	0,00061716	188,109751	1,04267453
120	2520	32,5	2,50574147	0,5	0,00099434	3,68415E-07	0,00060697	185,004951	0,61153932
120	2640	33	2,544291339	0,5	0,00096375	3,57079E-07	0,00059756	182,136483	0,34074038
120	2760	33,4	2,575131234	0,4	0,00093302	3,45694E-07	0,00058796	179,209337	0,17986296
120	2880	33,6	2,590551181	0,2	0,0008995	3,33273E-07	0,0005773	175,96056	0,08966775
120	3000	33,8	2,605971129	0,2	0,00086866	3,21847E-07	0,00056732	172,917785	0,04207284
120	3120	34	2,621391076	0,2	0,00084019	3,11299E-07	0,00055794	170,060755	0,01850712
120	3240	34,1	2,62910105	0,1	0,00081145	3,00651E-07	0,00054832	167,127003	0,00542731

**4.2.1 Cálculo de Reynolds y coeficiente de arrastre** Es importante conocer el número de Reynolds ya que junto con el coeficiente de arrastre se debe corroborar el tipo de flujo para la posterior aplicación de la ley de Stokes.

En la grafica 24 se hace una comparación de los coeficientes de arrastre aplicando y omitiendo la ley de Stokes, observando que se cumple la ley a causa de ser los Reynolds muy bajos generando altos coeficientes de arrastre.

**Figura 24** Comparación de coeficiente de arrastre



A pesar que el equipo de centrifugación tiene una velocidad angular de 1600 RPM no genera flujo turbulento en la emulsión, corroborando que se puede aplicar la ley de Stokes.

### 4.3 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS SOFTWARE (Crystal ball)

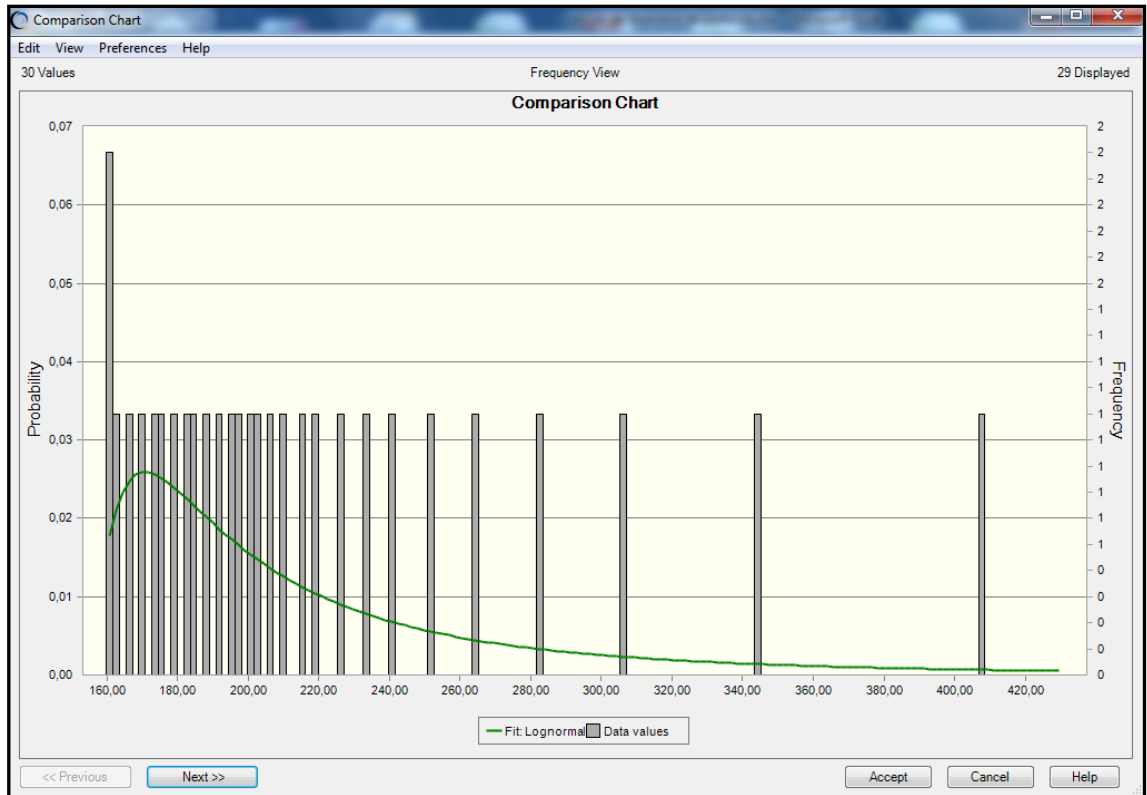
Después de medir los diámetros de partículas, se cargan estos datos al software para posteriormente someterlos a Simulación Montecarlo.

La utilidad del software radica en la sencillez como se puede manipular información extensa. Sin embargo, su utilidad radica en el principio básico de la estadística y es ajustar una serie de datos obtenidos de cierta población donde cualquiera de estos datos finalmente esté dentro del rango que se quiere estudiar.

La figura 25 muestra el ajuste estadístico modelado por el software a la muestra, donde la probabilidad de los diámetros de partícula medidos está acorde a la distribución log-normal.

Las barras presentadas en la figura 25 son la medida de acumulación de valores en un rango determinado. Donde las barras más altas representan la probabilidad de diámetros de partícula muy similares que están concentradas en un tiempo determinado, es decir, que el tiempo de giro del equipo de centrifugación está siendo cada vez mayor y no se presenta depositación continua de partículas, obligando a aumentar progresivamente el tiempo para que exista un incremento en el %BSW sedimentado.

**Figura 25** Ajuste estadístico 22 API



La figura 26 muestra específicamente la similitud entre los datos medidos y los datos ajustados y evidencia una diferencia del % 0.0812, mostrando el grado de confiabilidad del ajuste log-normal mientras que para otras distribuciones el porcentaje es alto reflejando la no confiabilidad de los datos ajustados.

**Figura 26** Ajuste Estadístico 22 API

Comparison Chart

Edit View Preferences Help

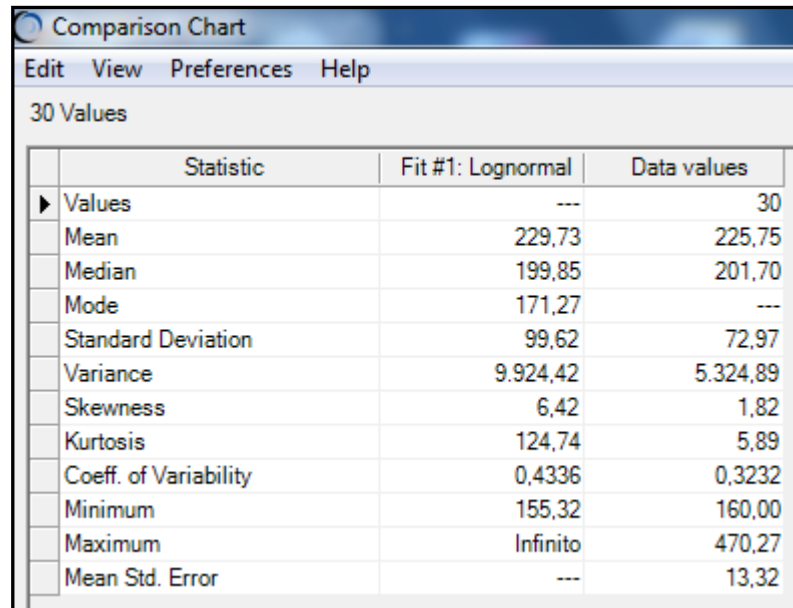
30 Values

Ranked by: Anderson-Darling

	Distribution	A-D	P-Value	Parameters
▶	Lognormal	.0812	0,993	Location=155,32;Mean=229,73;Std. Dev.=99,62
	Pareto	,3391	---	Location=158,33;Shape=3,17038
	Weibull	,6468	0,572	Location=160,00;Scale=65,21;Shape=0,92672
	Max Extreme	,8876	0,022	Likeliest=197,60;Scale=41,12
	Logistic	1,4956	0,000	Mean=213,29;Scale=37,29
	Gamma	1,7243	0,063	Location=160,00;Scale=132,70;Shape=0,49552
	Student's t	2,0559	---	Midpoint=225,75;Scale=59,77;Deg. Freedom=6,
	Normal	2,2625	0,000	Mean=225,75;Std. Dev.=72,97
	Min Extreme	3,5942	0,000	Likeliest=267,12;Scale=97,60
	Exponential	7,8962	0,000	Rate=0,00
	Triangular	7,9872	---	Minimum=154,91;Likeliest=160,00;Maximum=52
	Uniform	14,9052	0,000	Minimum=149,99;Maximum=480,28
	Beta	39,0532	---	Minimum=175,19;Maximum=559,85;Alpha=0,3;
	BetaPERT	43,0047	---	Minimum=175,19;Likeliest=175,19;Maximum=55

En la figura 27 detalla las propiedades estadísticas de la distribución ajustada, estos datos representan la medida y el grado de dispersión que evidencia el diámetro de partícula en una emulsión directa. El valor que ratifica lo mencionado lo determina la desviación estándar con un valor supremamente alto de 99,62, quiere decir que los tamaños están demasiados dispersos mostrando que no se puede hacer énfasis en la media estadística por que este dato no sería el correcto para el diseño.

**Figura 27** Propiedades estadísticas 22 API



	Statistic	Fit #1: Lognormal	Data values
▶ Values		---	30
Mean		229,73	225,75
Median		199,85	201,70
Mode		171,27	---
Standard Deviation		99,62	72,97
Variance		9.924,42	5.324,89
Skewness		6,42	1,82
Kurtosis		124,74	5,89
Coeff. of Variability		0,4336	0,3232
Minimum		155,32	160,00
Maximum		Infinito	470,27
Mean Std. Error		---	13,32

#### 4.4 TAMAÑO DE PARTICULA PARA DISEÑO.

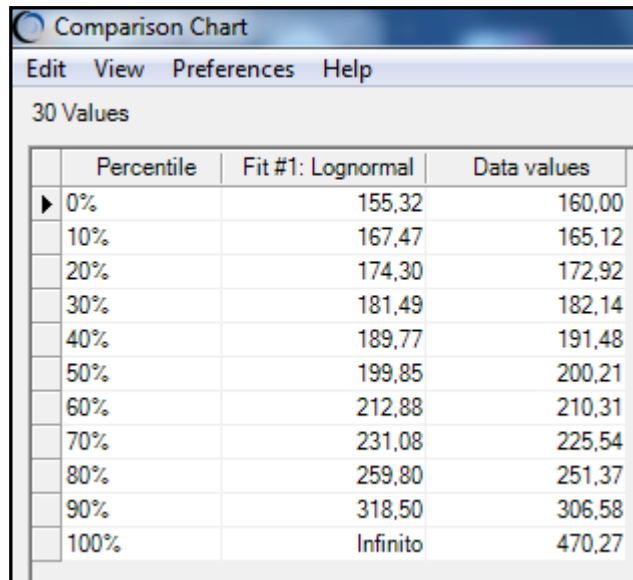
El tamaño de gota de diseño hace referencia al tamaño con el que se diseñará el sistema de separación.

La estadística es una herramienta fundamental con base matemática referente a la recolección, análisis e interpretación de los datos de la muestra del crudo analizado previamente, para ayudar en la resolución de la toma de decisiones o para explicar las condiciones regulares o irregulares de la variable que se está analizando.

En la figura 28 detalla diferentes percentiles de la distribución previamente ajustada. Un percentil hace referencia a la cantidad de valores o datos calculados que se encuentran por debajo del mismo, por ejemplo, el percentil cero hace referencia al diámetro de partícula mínimo de 155,32 micras,

indicando que ningún valor o diámetro calculado se encuentra por debajo de este valor.

**Figura 28** Percentiles 22 API



Percentile	Fit #1: Lognormal	Data values
0%	155,32	160,00
10%	167,47	165,12
20%	174,30	172,92
30%	181,49	182,14
40%	189,77	191,48
50%	199,85	200,21
60%	212,88	210,31
70%	231,08	225,54
80%	259,80	251,37
90%	318,50	306,58
100%	Infinito	470,27

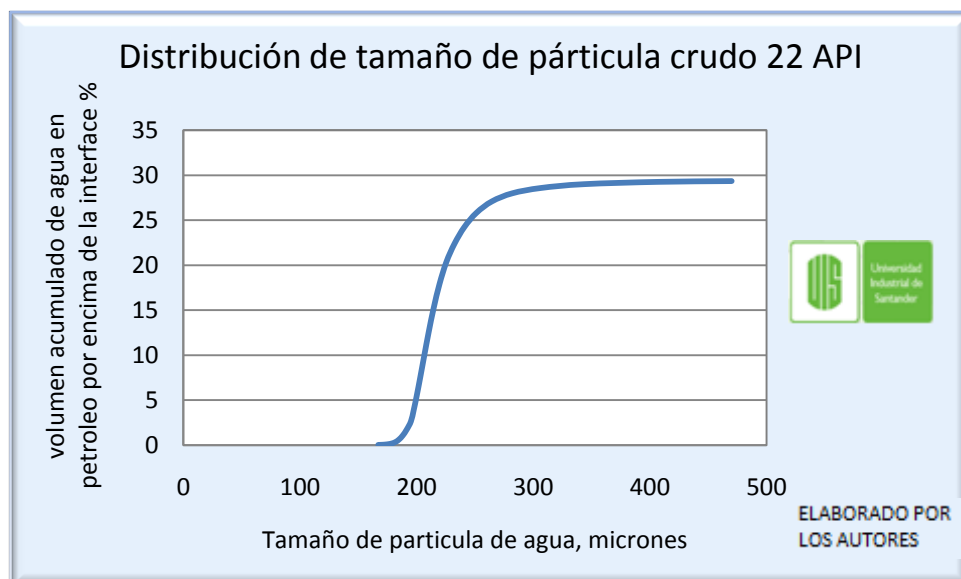
#### 4.5 INFLUENCIA DE %BSW EN EL DIÁMETRO DE PARTÍCULA

Es difícil predecir el tamaño de partícula de la fase dispersa, a menos que se tengan los datos de laboratorio disponibles. Se dice que los buenos resultados se obtienen por el tamaño del colchón de aceite de tal manera que las gotas de 500 micrones de agua y más grandes se sedimenten. Si este criterio se cumple, la emulsión debe ser tratada por equipos intermedios pero esta debe contener menos de 5% y 10% agua. En sistemas de crudo pesado, a veces es necesario diseñar con diámetros de partícula de 1000 micrones, en tales casos, la emulsión puede contener hasta 20% a 30% de agua.

Los estudios elaborados en el laboratorio arrojaron datos diferentes a pesar que la muestra de 22 API contiene un %BSW de aproximadamente 30%, mostrando tamaños de partícula más pequeños, dejando en evidencia que es difícil seguir los parámetros de predicción mostradas en el párrafo anterior. En

la figura 29 se muestra la influencia que tiene el %BSW en el diámetro de partícula, dejando claro que a mayor %BSW el tamaño de partícula en la muestra es más grande. Desde este punto de vista podemos encontrar el tamaño de partícula más pequeño después que se sedimenta todo %BSW y encontrar estrategias estadísticas para diseñar con más precisión.

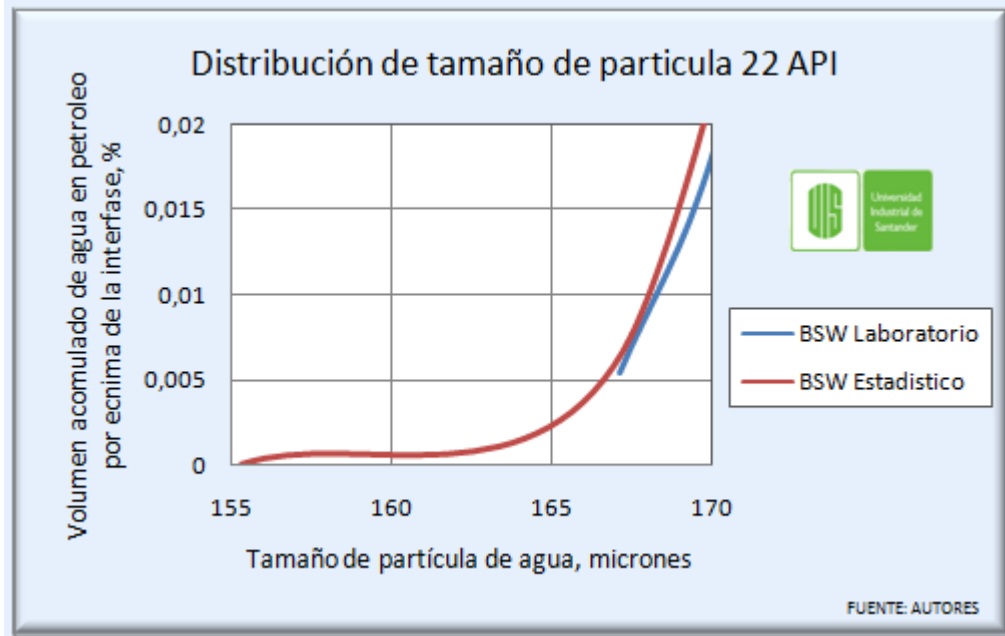
**Figura 29** Diámetro de partícula vs %BSW 22 API



También se observa que con los diámetros de partícula grandes no se logra la sedimentación de la totalidad del agua emulsionada, en cambio los tamaños pequeños logran la sedimentación total del volumen de agua, en el rango de diámetro (170 y 200) micrones.

En la figura 30 se muestra el efecto del %BSW pero con los datos ajustados estadísticamente y comparándolo con el hallado en laboratorio enunciando ciertas diferencias importantes a la hora de observar cual diámetro de partícula podría sedimentar totalmente el volumen de agua disuelto en el petróleo por encima de la interfase.

**Figura 30** Comparación de BSW (laboratorio y estadístico).



Se observa que los datos de laboratorio no muestran el tamaño más pequeño de la distribución de la partícula, sin embargo, aplicando técnicas estadísticas se logra reconocer este tamaño de partícula, disminuyendo la incertidumbre de esta medición.

#### 4.6 DISEÑO DE SEPARADOR BIFASICO

A continuación se presenta un diseño de un tanque de lavado GUN BARREL aplicando los principios de la norma API 640 para diseños de tanques de acero.

**4.6.1 Criterios de diseño** En la tabla 6 se observa los diferentes percentiles para una muestra de 22 API, aplicando la metodología donde se hace uso

del software Crystal ball para determinar el tamaño de partícula que más se acomode al diseño.

También se hacen comparaciones de medidas de percentiles que son el mismo tamaño de partícula y se asumen otros tamaños para hacer comparaciones de diseño.

Para decidir qué percentil tomar se hace referencia de %BSW fijando cuáles de los percentiles son más representativos en el momento de diseñar.

La tabla 6 muestra los diferentes percentiles y qué %BSW hay dentro de la emulsión cuando esta gota aún no ha sedimentado.

**Tabla 6** Análisis de percentiles con respecto a %BSW

percentiles %	d estadístico micron	% BSW	Volumen no retirado %
100	470,27	29,32551	100
90	318,5	28,61324848	97,57118795
80	259,8	25,7871111	87,93405809
70	231,08	19,2155434	65,52501014
60	212,88	12,4902533	42,5917684
50	199,85	5,43789385	18,54322005
40	189,77	1,543325015	5,262738875
30	181,49	0,400951824	1,367245869
20	174,3	0,072344476	0,24669469
10	167,47	0,007597882	0,02590878
0	155,32	0	0

**4.6.2 Alternativa para diseño de tanques Gun Barrel** Se debe tener en cuenta que uno de los objetivos principales es generar precisión en el diseño y para ello se hace énfasis en los percentiles analizados y así escoger el percentil adecuado para diseñar.

En los siguientes ítems se mostrarán detalles si se toman ciertos percentiles:

- Percentil 0%: Sedimenta todo el agua que se encuentra en el crudo sin necesidad de agregar solventes y químicos, sería el ideal pero el inconveniente radica que es el diámetro más pequeño generando tanques muy grandes.
- Percentil 10%: Se sedimenta el 99.97% del agua, aportado por el aumento del tamaño de partícula generando dimensiones de diseño más pequeños que el que arrojaría el percentil 0%.
- Percentil 50%: Se sedimenta el 81.46% de agua, esto requeriría la inclusión de tratamiento como químico y solvente y condiciones de temperatura elevadas en el tanque con la cual genera la disminución de densidad específica y viscosidad de las dos fases por consiguiente genera velocidades de asentamientos más rápidas, pero para alcanzar estas temperaturas genera gastos a la empresa que diseñe el tanque con dicho percentil.
- Asumido: En la industria petrolera se ha asumido diámetros de partícula por encima y por debajo del percentil cero, causando sobre diseño en medidas y elevando el costo de fabricación, si se tiene en cuenta que por cada barril de diseño aproximadamente el costo es de 70 US, el diámetro de partícula que usualmente se toma es de 500 micras.

**4.6.3 Parámetros de diseño utilizando la metodología** se diseñará siguiendo los parámetros de diseño mostrados en el capítulo 3 de facilidades de superficie visto en el curso de pregrado de ingeniería de petróleos de la

universidad industrial de Santander más la influencia de la temperatura sobre el diseño y los conceptos de diseño de la NORMA API 650 con el objetivo de encontrar una optimización en dimensiones de separadores líquido - líquido empleando los datos encontrados por la estadística desarrollada y posteriormente hacer una breve comparación con los datos que se asumen a la hora de diseñar.

## **4.7 PROPUESTA PARA OPTIMIZACION DE LOS PROCESOS Y DEL DISEÑO DE LAS FACILIDADES DE PRODUCCION.**

### **4.7.1 Justificación**

- Para mejorar el proceso de separación en este tipo de tanques, la optimización de los procesos de separación está orientada hacia la separación de fases ya que esta se ha venido realizando en el tanque de lavado con diseños asumidos según el dato de laboratorio como lo es el tamaño de partícula, evidenciando una baja eficiencia de separación.
- Esta propuesta se basa en el esquema de procesos que mantiene los principios básicos del libro de facilidades de superficie Ken Arnold pero teniendo en cuenta varios parámetros de diseño como los son:
  - a. Relación de Esbeltez entre (0,5 a 1,1) norma API 650 para encontrar altura y el diámetro de tanque que pueda retener el caudal de producción el cual estipula la producción del campo el cual se hará análisis.
  - b. Ajuste de tiempos de residencia asumidos para encontrar el tiempo más apropiado dependiendo de la temperatura a la cual llegara el crudo al tanque.
  - c. Manejar apropiadamente las diferentes temperaturas para lograr el diseño preciso y óptimo (60 y 250 F), ya que esta afecta potencialmente la

gravedad específica de las dos fases, la viscosidad de las dos fases, la velocidad de sedimentación y por ende el diseño del tanque.

#### **4.8 PROPUESTA DE DISEÑO DE UN GUN BARREL.**

##### **Consideraciones:**

- Primero que todo se deben conocer todos los datos de laboratorio y de la simulación Montecarlo referente al diámetro de partícula para iniciar.
- Conocer todos los parámetros de diseño de Gun barrel mostrada por la NORMA API 650.
- Se harán diseños representativos para los percentiles más influyentes en el diseño generados por la metodología y hacer ciertas comparaciones y decidir cuál es el más óptimo de los diseños.
- Las temperaturas con las que se trabajaran serán evaluadas detalladamente por una hoja calcula en Excel desarrollada por los autores y tomar buenas decisiones en el diseño y llegar a una consideración óptima.
- Se evaluarán los percentiles hallados en la estadística del diámetro de partícula para tener puntos de referencia de diseño y aplomar más la decisión del diseño que se elegirá.
- Hacer un análisis económico y concluir el aporte de la metodología al diseño de separadores líquido-líquido aplicado a crudos pesados.

## 4.9 DATOS DE ENTRADA PARA EL DISEÑO

Los datos de laboratorio se han obtenido con una temperatura de 60 F que será el punto de referencia de iniciación y de las correlaciones que se harán a medida que se calculan todas las operaciones tanto matemáticas y estadísticas.

DATOS:

Q <sub>o</sub>	= 15000 BBPD
Q <sub>w</sub>	= 6000 BBPD
Viscosidad cinemática	= 175 cK @ 60 F
OIL	= 22 API
S <sub>Go</sub>	= 141, $1 / (131,1 + 22) = 0,9216198563 @ 60 F$
S <sub>Gw</sub>	= 1.032 @ 60 F
TR <sub>w</sub> = TR <sub>o</sub>	= Se asumirán para encontrar el verdadero tiempo.
Diámetro de partícula	= Se tomaran los percentiles (tamaño de partícula estadístico) más representativos para el optimo diseño y el asumido que es 500 micras.

### OPCION 1 DE DISEÑO

Diseño de tanque Gun Barrel con el percentil P<sub>0</sub> = 155.32 micrones.

Teniendo estos datos importantes se hará la tabla en Excel mostrada en el capítulo 3 de los diferentes parámetros de la ley de Stokes que varían según la temperatura, estos parámetros no variaran con el cambio de tamaño de partícula entonces se tendrán en cuenta para todos los cálculos de diseño siguientes.

**Tabla 7** variación de la viscosidad y la gravedad especifica

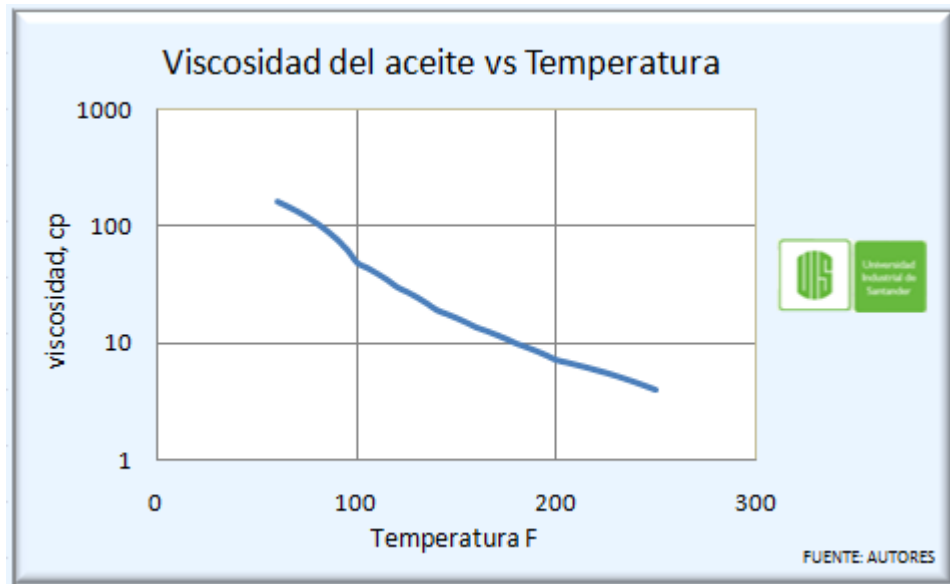
TEMP F	Viscosidad cp	GRAVEDAD ESPECIFICA	
	22 API	AGUA	22 API
120	36,86787608	1,0051	0,9051
125	32,94216816	1,0031	0,9036
130	29,5647513	1,0011	0,9021
135	26,64216184	0,9991	0,9006
140	24,09954667	0,9971	0,8991
145	21,87645994	0,9951	0,8976
150	19,9237142	0,9931	0,8961
155	18,20099675	0,9911	0,8946
160	16,67504765	0,9891	0,8931
165	15,31825439	0,9871	0,8916
170	14,10755885	0,9851	0,8901
175	13,02360025	0,9831	0,8886
180	12,05003828	0,9811	0,8871
185	11,17301466	0,9791	0,8856
190	10,38072209	0,9771	0,8841
195	9,663056915	0,9751	0,8826
200	9,011337751	0,9731	0,8811

Las graficas muestran los perfiles que tienen la viscosidad y la densidad especifica con el cambio de temperatura, todos estos datos fueron elaborados en laboratorio y se le hicieron ciertos ajustes matemáticos para tener correlaciones en donde se pueden hallar sus diferentes resultados a diferentes temperaturas.

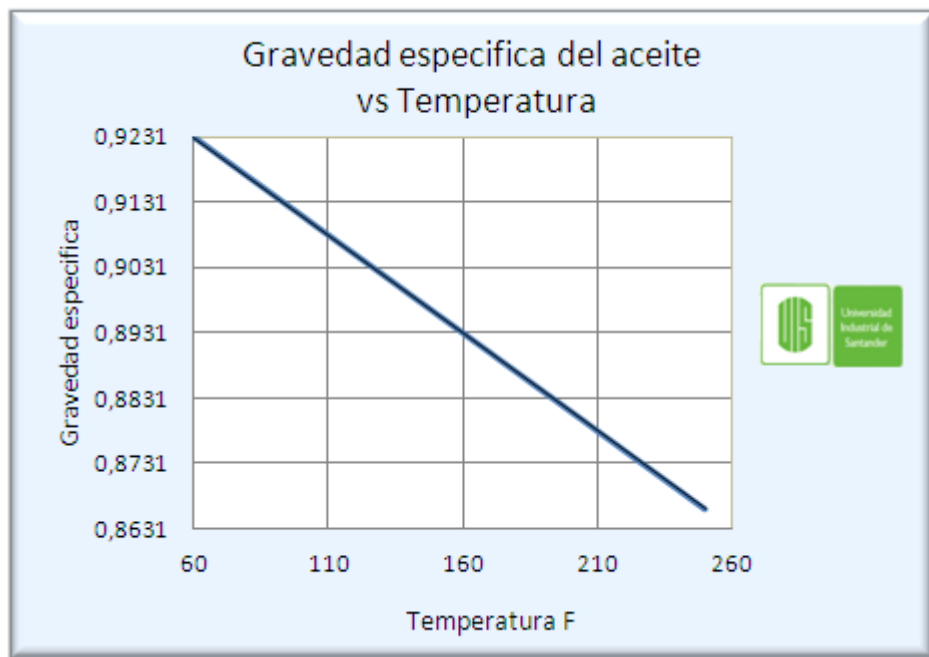
$$\mu = 2E + 07 * T^{-2,758} \quad (4.2)$$

$$SG_o = -0,0003 * T + 0,9411 \quad (4.3)$$

**Figura 31** Viscosidad vs Temperatura



**Figura 32** Gravedad específica del aceite vs Temperatura



1. Se halla el diámetro mínimo que puede tener el tanque para tener un punto de partida:

Con la ecuación 3.5 que fue enunciada en el capítulo 3:

$$D_{min} = 765,09127 \text{ in}$$

Se hallan los tiempos de requerimientos de residencia teniendo en cuenta el diámetro mínimo. En la tabla 8 se observa cómo se debe tabular estos datos para generar una línea recta en una grafica y observar todo los efectos en ella.

**Tabla 8** Requerimientos de tiempo de residencia

dmin (in)	hw+ho(in)
766,094127	313,0855918
776,094127	305,0693339
786,094127	297,3570534
796,094127	289,9335731
806,094127	282,7846514

Luego se hallan la longitud de costura costura Ls-s junto con la relación de esbeltez como lo muestra le tabla 9:

**Tabla 9** longitud costura-costura

dmin (in)	hw+ho(in)	12Ls-s/d	Ls-s(ft)
766,094127	313,0855918	0,507882228	32,42379931
776,094127	305,0693339	0,491009171	31,75577783
786,094127	297,3570534	0,474952096	31,11308778
796,094127	289,9335731	0,459661189	30,49446442
806,094127	282,7846514	0,445090269	29,89872095

2. Se hacen varios cálculos de Ls-s como lo muestra la tabla 10 en función de la relación de esbeltez RE entre los rengos (0,5 y 1,1) estipulados en la NORMA 650 API, se observa que en este caso se alcanza la relación de

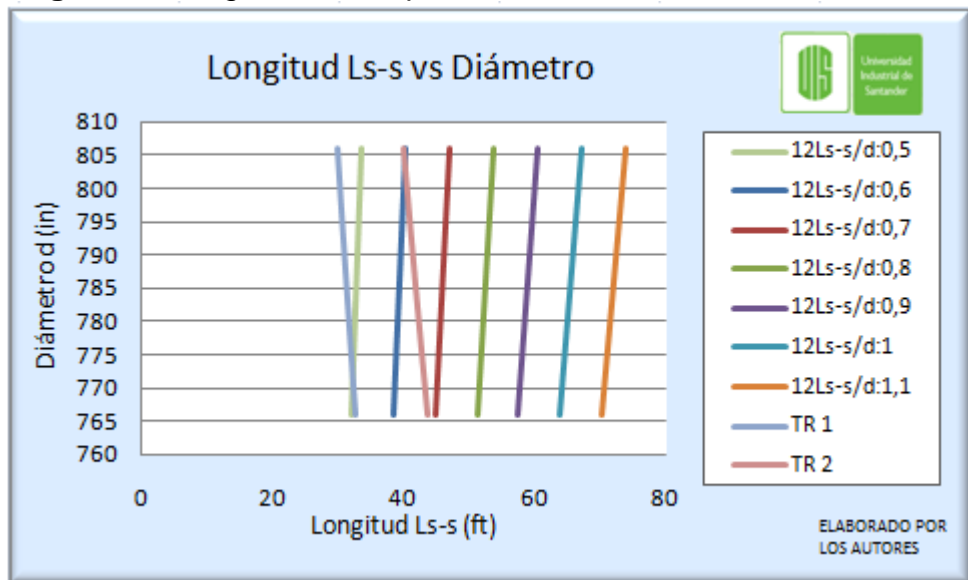
esbeltez en la primera opción pero se debe analizar con el tiempo y la altura del colchón de aceite  $h_0$  para que cumple con el volumen requerido.

**Tabla 10** calculo de dimensiones en funcion de la relacion de esbeltez

CALCULO DE Ls-s EN FUNCION DE LA RELACION 12 Ls-s y de TR 1								
RELACION	Ls-s ft	Ls-s ft	Ls-s ft	Ls-s ft	Ls-s ft	Ls-s(ft)	Ls-s(ft)	DIAMETRO
ESBELTEZ	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	in
Opción 1	31,92058862	38,30470635	44,68882407	51,0729418	57,45705952	63,84117725	70,22529497	766,094127
Opción 2	32,33725529	38,80470635	45,27215741	51,73960847	58,20705952	64,67451058	71,14196164	776,094127
Opción 3	32,75392196	39,30470635	45,85549074	52,40627513	58,95705952	65,50784392	72,05862831	786,094127
Opción 4	33,17058862	39,80470635	46,43882407	53,0729418	59,70705952	66,34117725	72,97529497	796,094127
Opción 5	33,58725529	40,30470635	47,02215741	53,73960847	60,45705952	67,17451058	73,89196164	806,094127

Hallado las diferentes dimensiones posibles con la relación de esbeltez (RE) se grafica longitud de costura costura Ls-s vs el diámetro del tanque D con su diferentes relaciones de esbeltez, también es conveniente involucrar el tiempo asumido en esta grafica para encontrar cual sería el tiempo real de retención. En la figura 33 se observa cómo debe quedar este ajuste o intercepción.

**Figura 33** longitud con respecto a RE



Nota: tiempo de residencia asumido 17,5 horas

En esta grafica se observa claramente que se pueden coincidir las líneas de relación de esbeltez y las de tiempo de residencia asumido y así encontrar las dimensiones precisas que almacenen el caudal con el cual se elaboraron los anteriores cálculos.

3. Para encontrar el volumen que se debería almacenar con el caudal de entrada, fácilmente se hacen varios cálculos con las cinco opciones de dimensiones de las diferentes relaciones de esbeltez para así encontrar el tiempo de residencia real. En la tabla 11 se encuentra los diferentes volúmenes a diferentes relaciones de esbeltez.

**Tabla 11** Volúmenes con respecto a RE

Volumen	BBL	BBL	BBL	BBL	BBL	BBL	BBL
Opción 1	18198,4485	21838,1382	25477,82792	29117,5176	32757,2073	36396,897	40036,5867
Opción 2	18920,4367	22704,5241	26488,6114	30272,6987	34056,7861	37840,8734	41624,9608
Opción 3	19661,2724	23593,5269	27525,78137	31458,0358	35390,2903	39322,5448	43254,7993
Opción 4	20421,1984	24505,4381	28589,67782	32673,9175	36758,1572	40842,3969	44926,6366
Opción 5	21200,4577	25440,5492	29680,64074	33920,7323	38160,8238	42400,9153	46641,0069

4. Se observa que la opción que cumple la especificación de volumen, está entre la opción 4 y 5 de la relación de esbeltez 0,5, pero para encontrar el valor del volumen exacto se debe utilizar la interpolación para encontrar las verdaderas dimensiones. En la tabla 12 se observan los datos de interpolación:

**Tabla 12** interpolación de datos

INTERPOLACION		ALTURA $h_0$ TR		TR REAL hr	
Ls-s ft	D in	$h_0$	$h_0$	t sedimentacion	t residencia
33,11414	796,094127	203,1507349	16,92922791	14,03849197	15,59832441
33,48007141	803,5586288	199,3940064	16,6161672	13,77888767	15,30987519
33,5308511	806,094127	198,1416265	16,51180221	13,69234344	15,21371493

5. Luego se halla la altura del colchón de aceite  $h_0$  para que por medio de esta altura encontrar el tiempo de sedimentación. Con este tiempo se halla el tiempo

de residencia real, esto se hace teniendo un factor de seguridad mostrado en la norma API 650 que es:  $t_r = t_s/0,9$  este tiempo está dado en horas.

Para hallar los tiempos de residencia se debe conocer la velocidad de sedimentación la cual sirve para hallar este tiempo.

$$t_s = \frac{h_o}{v_s} \quad (4.4)$$

$t_s$  = Tiempo de sedimentación, hr

$h_o$  = Altura del colchón de aceite, ft

$v_s$  = Velocidad de sedimentación, ft/hr

$$v_s = \frac{1.78 \cdot 10^{-6} (\Delta SG) d_m^2}{\mu} \quad (4.5)$$

$\Delta SG$  = Diferencia de densidades específicas

$d_m$  = Diámetro de partícula de agua, micrones

$\mu$  = Viscosidad de la fase continua, cp

Luego se hallan el número de Reynolds junto con el coeficiente de arrastre y se analizan a diferentes temperaturas para observar si cumple con la ley de Stokes y seguir con el análisis. En la tabla 13 se hallan los anteriores parámetros.

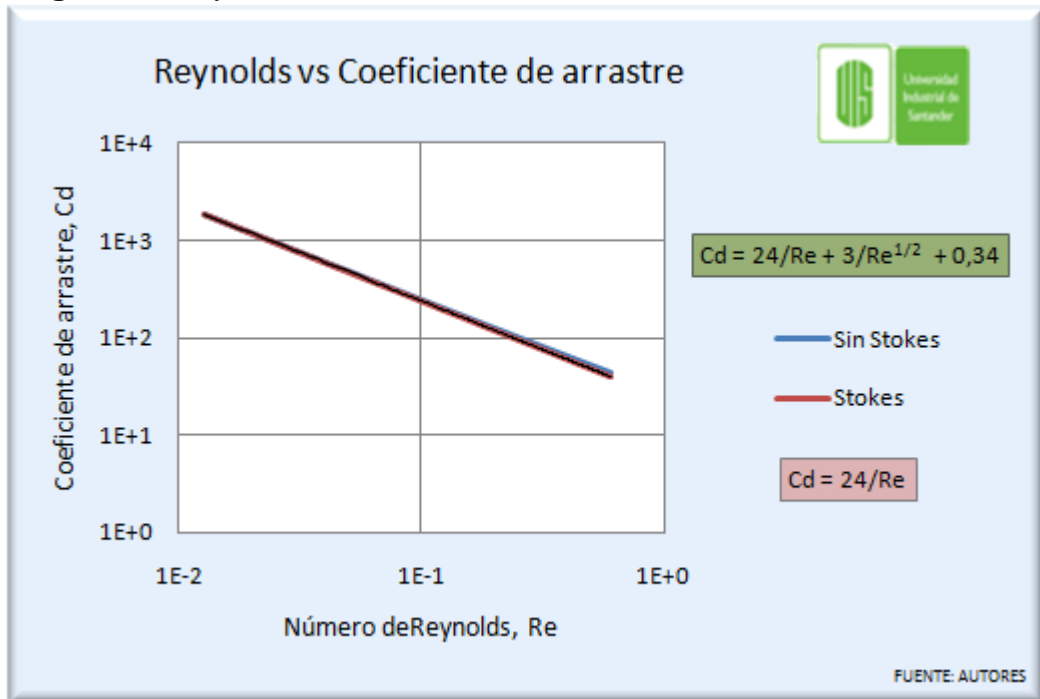
**Tabla 13** datos para diseño

TEMP F	Vs(ft/min)	ts hr	tr hr	Reynolds	Cd sin stokes	cd stokes
	22 API	22API	22 API	22API	22 API	22 API
120	0,006988402	39,82032781	45,07841314	0,012858213	1893,307668	1866,511256
125	0,007782102	35,7590367	40,4808478	0,015993022	1524,716692	1500,654437
130	0,00862754	32,25490353	36,51401048	0,019716589	1238,954193	1217,249072
135	0,00952561	29,21392726	33,07148772	0,024108704	1015,152313	995,4911031
140	0,010477151	26,56069957	30,0679139	0,029255979	838,224495	820,3451272
145	0,011482953	24,23422533	27,43423979	0,035252088	697,1289744	680,8107384
150	0,012543752	22,18478789	25,11418386	0,042197984	583,6916697	568,7475494
155	0,013660235	20,37157329	23,06154287	0,050202118	491,7968535	478,0674807
160	0,01483304	18,76085221	21,23813372	0,059380638	416,8233017	404,172146
165	0,016062758	17,32457613	19,6122042	0,069857584	355,2465988	343,5561124
170	0,017349931	16,03928399	18,15719533	0,081765063	304,3553918	293,5238971
175	0,018695056	14,88524409	16,85076994	0,09524342	262,0467498	251,9859105
180	0,020098583	13,84577548	15,67404443	0,110441391	226,6770769	217,30983
185	0,021560919	12,90670755	14,61097704	0,127516246	196,9524582	188,2113129
190	0,023082423	12,05594693	13,64787751	0,146633914	171,8472834	163,6729141
195	0,024663415	11,28312804	12,77301156	0,167969105	150,5433428	142,8834191
200	0,026304168	10,57932971	11,97627999	0,191705405	132,3838787	125,1920882

Según los datos el tiempo y las dimensiones del tanque se ajustan a una temperatura de 180 F, quiere decir que el crudo debe entrar a esta temperatura para cumplir con las expectativas de diseño.

Con la figura 34 se puede observar que la ley de Stokes cumple casi para todas las temperaturas del percentil analizado.

**Figura 34** Reynolds vs coeficiente de arrastre



6. Después de analizar todos los factores posibles que inciden en el diseño de este sistema de separación para crudo pesado. Se concluye que las dimensiones estadísticas para este sistema con el percentil  $P_0$  son:

**Tabla 14** Dimensiones y tiempo de residencia de tanque opción 1 de diseño

	DIMENSIONES		T	PERCENTIL	TR	VOLUMEN
	L ft	D in	F	micras	hr/min/seg	BBL
EXACTO	33,48007141	803,5586288	180	155,32	15, 18, 24	21000
APROX	33,5	804	180	155,32	15, 30	21035,58942

Nota: Relación de esbeltez 0,5

Para que el lector pueda entender un poco más sobre este tipo de cálculos en el anexo se puede encontrar la tabla de Excel completa explicando todos cálculos pertinentes de la metodología.

Hay que renombrar que este percentil es el diámetro mínimo de la distribución de tamaño de partícula por lo tanto con los estudios realizados se tiene la

confiabilidad de cuando esta partícula sedimente en el tiempo encontrado se tendrá el BSW sedimentado en su totalidad.

## **OPCION 2 DE DISEÑO**

Diseño para Gun Barrel percentil  $P_{10}$ : 167,47 micras

1. Como se se habia dicho con anterioridad los datos que cambian directamente con la temperatura son los mismos para los diferentes tamaños de partícula entonces se puede proseguir con los datos de diametro minimo del tanque

$$D_{\min} = 793,7393232 \text{ in}$$

2. Los datos de requerimientos de tiempo de residencia serian:

**Tabla 15** Requerimientos de tiempo de residencia

$d_{\min}$ (in)	$hw+ho$ (in)
794,7393227	332,4833417
804,7393227	324,2715507
814,7393227	316,3602713
824,7393227	308,7350176
834,7393227	301,3821658

Los cálculos realizados con el tiempo de residencia asumido para encontrar el real:

**Tabla 16** Longitud costura-costura

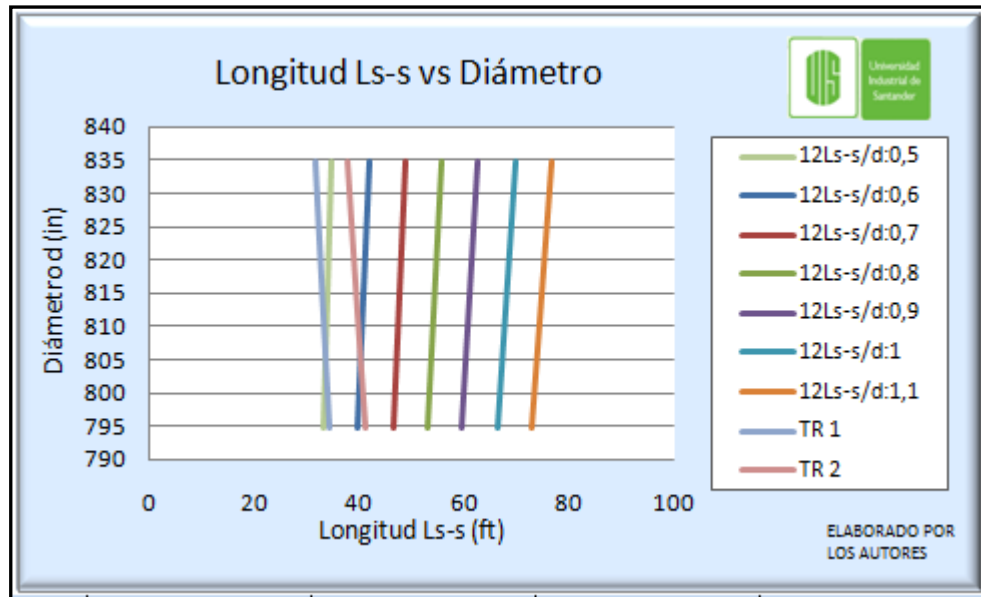
CALCULOS REALIZADOS TR			
dmin (in)	hw+ho(in)	12Ls-s/d	Ls-s(ft)
794,7393227	332,4833417	0,513984057	34,04027848
804,7393227	324,2715507	0,497392807	33,35596256
814,7393227	316,3602713	0,481577678	32,69668928
824,7393227	308,7350176	0,466492875	32,06125147
834,7393227	301,3821658	0,452095829	31,44851381

2. Los cálculos realizados con las diferentes relaciones de esbeltez (0,5 a 1,1) para generar la grafica con los tiempo de residencia y lograr intercepciones entre las líneas y encontrar el tiempo real de residencia.

**Tabla 17** dimensiones con respecto a RE

CALCULO DE Ls-s EN FUNCION DE LA RELACION 12 Ls-s y de TR 1								
RELACION	Ls-s ft	Ls-s ft	Ls-s ft	Ls-s ft	Ls-s ft	Ls-s(ft)	Ls-s(ft)	DIAMETRO
ESBELTEZ	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	in
Opción 1	33,11413845	39,73696614	46,35979383	52,98262152	59,60544921	66,22827689	72,85110458	794,7393227
Opción 2	33,53080511	40,23696614	46,94312716	53,64928818	60,35544921	67,06161023	73,76777125	804,7393227
Opción 3	33,94747178	40,73696614	47,52646049	54,31595485	61,10544921	67,89494356	74,68443792	814,7393227
Opción 4	34,36413845	41,23696614	48,10979383	54,98262152	61,85544921	68,72827689	75,60110458	824,7393227
Opción 5	34,78080511	41,73696614	48,69312716	55,64928818	62,60544921	69,56161023	76,51777125	834,7393227

**Figura 35** longitud vs diámetro



Nota: Tiempo de residencia asumido 18 horas

4. Con esto se busca el volumen que se aproxime el cual se almacenara con el caudal de entrada e interpolar para así determinar las dimensiones del tanque.

**Tabla 18** volúmenes con respecto a RE

Volumen	BBL	BBL	BBL	BBL	BBL	BBL	BBL
Opción 1	20317,11652	24380,53982	28443,96312	32507,38642	36570,80973	40634,23303	44697,65633
Opción 2	21093,74225	25312,4907	29531,23916	33749,98761	37968,73606	42187,48451	46406,23296
Opción 3	21889,91114	26267,89336	30645,87559	35023,85782	39401,84005	43779,82227	48157,8045
Opción 4	22705,86602	27247,03922	31788,21242	36329,38562	40870,55883	45411,73203	49952,90523
Opción 5	23541,84974	28250,21969	32958,58964	37666,95958	42375,32953	47083,69948	51792,06943

Se observa que la opción 1 y 2 son las que cumplen con el volumen entonces en base a esta información se interpola y se hallan las dimensiones.

**Tabla 19** interpolación de datos

INTERPOLACION		ALTURA ho		TR REAL hr	
Ls-s ft	D in	ho in	ho ft	t sedimentacion	t residencia
33,11414	824,7393227	233,5299662	19,46083052	17,36883673	19,29870747
33,48051155	803,5533469	228,4349716	19,03624763	16,98989551	18,87766168
33,5308511	834,7393227	227,7621606	18,98018005	16,98989551	18,87766168

5. Se halla el tiempo de residencia real con la velocidad de sedimentación y luego el número de Reynolds junto con el coeficiente de arrastre y observar si se cumple la ley de Stokes.

**Tabla 20** datos de diseño

TEMP F	Vs(ft/min)	ts hr	tr hr	Reynolds	Cd sin stokes	cd stokes
120	0,00812451	39,05106847	43,39007607	0,014948579	1630,380786	1605,503795
125	0,009047242	35,06823442	38,96470491	0,018593015	1313,148519	1290,80732
130	0,010030123	31,63179499	35,14643888	0,022921924	1067,187606	1047,032531
135	0,011074192	28,64956509	31,8328501	0,028028066	874,5439966	856,2845461
140	0,012180427	26,04759313	28,94177015	0,034012137	722,2373512	705,6304699
145	0,013349742	23,76606233	26,40673592	0,040983035	600,767171	585,6081609
150	0,014582995	21,75621645	24,17357383	0,049058129	503,1001466	489,2155597
155	0,015880985	19,97802999	22,1978111	0,058363498	423,9738956	411,2159259
160	0,017244454	18,39842524	20,44269471	0,069034175	359,4118757	347,6538982
165	0,018674087	16,98989551	18,87766168	0,081214362	306,3812381	295,514233
170	0,020170517	15,72943297	17,47714775	0,095057646	262,5487095	252,4783759
175	0,021734319	14,59768711	16,21965235	0,110727185	226,104529	216,7489396
180	0,023366019	13,57829922	15,08699914	0,128395897	195,6341779	186,9218605
185	0,025066087	12,65737245	14,06374717	0,148246618	170,0240344	161,8923948
190	0,026834943	11,82304704	13,13671894	0,170472254	148,3913571	140,7853737
195	0,028672957	11,06515767	12,29461963	0,195275916	130,0318817	122,9030207
200	0,030580449	10,37495549	11,52772832	0,222871038	114,3802847	107,6855937

Según los datos el tiempo y las dimensiones del tanque se ajustan a una temperatura de 165 F, quiere decir que el crudo debe entrar a esta temperatura para cumplir con las expectativas de diseño.

5. Las dimensiones ajustadas estadísticamente con el  $P_{10}$  de este sistema de separación de crudo pesado son:

**Tabla 21** Dimensiones y tiempo de residencia de tanque de opción 2

	DIMENSIONES		T	PERCENTIL	TR	VOLUMEN
	L ft	D in	F	micras	hr/min/seg	BBL
EXACTO	33,48051155	803,5533469	165	167,47	18, 52, 39	21000
APROX	33,5	804	165	167,47	18	21035,58942

Nota: relación de esbeltez 0,5

El  $P_{10}$  es un dato que estipula que cuando los tamaños de partícula con esta medida sedimenten quedara solo 0,0259% de volumen de agua en el crudo sobre la interfase. Pero como se observa al tener 165 F el tiempo de residencia es más largo. También se podría observar con otro tipo de relación de esbeltez pero esto genera más tiempo porque la altura aumente al aumentar la relación de esbeltez.

### **OPCION 3 DE DISEÑO**

Diseño de Gun Barrel con el percentil  $P_{50} = 199,48$  micrones

1. Diámetro mínimo del tanque ecuación yy del capítulo 3

$$D_{min} = 786,67204 \text{ in}$$

Después de hacer todos los pasos con los cálculos que anteriormente se hicieron con los otros percentiles se llega a la conclusión estadística, que las dimensiones con el  $P_{50}$ :

**Tabla 22** interpolación de datos

INTERPOLACION		ALTURA ho		TR REAL hr	
Ls-s ft	D in	ho	ho	t sedimentacion	t residencia
33,11414	817,6726038	221,600002	18,46666683	16,18937696	17,98819662
33,47980153	803,5618675	218,3637147	18,19697623	15,95294432	17,72549368
33,5308511	827,6726038	216,1466002	18,01221669	15,79096912	17,54552125

**Tabla 23** Dimensiones y tiempo de residencia de tanque opción 3

	DIMENSIONES		T	PERCENTIL	TR	VOLUMEN
	L ft	D in	F	micras	hr/min/seg	BBL
EXACTO	33,47980153	803,5618675	145	199,45	17, 43, 31	21000
APROX	33,5	804	145	199,45	17, 45	21035,58942

Nota: relación de esbeltez 0,5

Este caso la temperatura se pudo reducir a 145 F pero existe un inconveniente. El  $P_{50}$  anuncia que dentro de la emulsión se encuentra el 18,54322005% de volumen de agua, esto es un gran inconveniente para la facilidad porque genera problemas en cuanto al tratamiento de la emulsión, causando gastos en rompedores y desmulsificantes sin tener la idea de cuánto se debería utilizar en caso de no conocer la metodología o otra herramienta para evitar este tipo de gastos.

### **OPCION 4 DE DISEÑO**

Diseño de Gun Barrel con diámetro de partícula asumido 500 micras

1. Diámetro mínimo del tanque:

$$D_{min} = 637,408842 \text{ in}$$

Haciendo los pasos de los cálculos matemáticos y estadísticos se obtienen las dimensiones con el diámetro de partícula de 500 micras.

**Tabla 24** Interpolación de datos

INTERPOLACION		ALTURA ho TR		TR REAL hr	
Ls-s ft	D in	ho	ho	t sedimentacion	t residencia
33,11414	668,4088421	164,3590262	13,69658552	7,883191025	8,759101139
49,54092371	660,5849984	163,2779184	13,6064932	7,831337593	8,701486214
33,5308511	678,4088421	159,4778955	13,28982463	7,649076193	8,498973547

El tiempo de retención de este cálculo es menor a los anteriores, se debe al alto tamaño de la partícula, su aumento en la densidad y la viscosidad.

**Tabla 25** Dimensiones y tiempo de residencia de tanque opción 4

	DIMENSIONES		T	PERCENTIL	TR	VOLUMEN
	L ft	D in	F	micras	hr/min/seg	BBL
EXACTO	49,54092371	660,5849984	85	500	8, 42, 5	21000
APROX	50	661	85	500	8, 45	21221,23743

Nota: relación de esbeltez de 0,9

En este caso existe una incertidumbre muy grande porque el tamaño de partícula tan grande genera un diámetro mínimo del tanque pequeño a comparaciones de los otros, pero la ventaja es la temperatura a la cual se trabaja siendo baja pero con este tamaño que no se encuentra dentro de la distribución de partícula, no se puede garantizar la sedimentación de todo el volumen de agua en el crudo.

Observando la estadística de los cuatro percentiles se llega a las siguientes conclusiones:

- Los aumentos de temperatura en la emulsión generan disminución en la viscosidad del crudo y en las densidades de las dos fase generando

velocidades más altas de las partículas en emulsión, esto es bueno para disminuir los tiempos de retención pero se debe tener mucho cuidado porque podrían generar sobredimensionamiento en los tanques que se diseñaran con este tipo de metodología.

- Si las partículas de la emulsión son grandes generan velocidades de sedimentación altas generando números de Reynolds altos teniendo coeficientes de arrastre pequeños evidenciando flujo turbulento, dando invalidez a la ley de Stokes.
- El manejo de la estadística en el diseño genera una gama de opciones creando criterios precisos de diseño a la hora de tomar una decisión económica en la facilidad la cual se diseñará.
- Asumir los tiempos de retención son una herramienta útil en el dimensionamiento de una facilidad por que genera las alturas de colchón de aceite preciso para la separación rápida del agua en emulsión.

## 5. ANALISIS ECONOMICO

A menudo se necesita saber con rapidez y confiabilidad cuánto puede pesar y costar un tanque de almacenamiento, a partir de una información preliminar, y para ello es bueno no tener ningún procedimiento que permita conocerlo.

Incluso en estimaciones detalladas en las que se van a pedir ofertas a suministradores, es conveniente que el departamento de estimaciones tenga procedimientos rápidos que sirvan para poder trabajar sin necesidad de esperar la llegada de las ofertas y para contrastar y comparar estas cuando lleguen.

Las formulas de cálculos expuestas a continuación sirven exclusivamente para estimar, y tienen la ventaja de que puedan emplearse con una información básica.

### 5.1 ESTIMACIONES DEL PESO DEL TANQUE

El peso de un tanque de almacenamiento en acero al carbono es función fundamentalmente del tipo de tanque y de sus dimensiones.

En este estudio se ha considerado tanques de las siguientes características:

- Forma constructiva: Techo cónico
- Norma de fabricación: API 650
- Materiales: ACERO AL CARBON

El peso para volúmenes de tanque inferiores a  $1500 \text{ m}^3$  se puede calcular con la expresión:

$$w = 2,93L + 0,14D^2 - 0,28D - 7,9 \quad (5.1)$$

Y para volúmenes de tanque superiores a  $1500 \text{ m}^3$  la expresión es:

$$w = 2,74L + 0,62D^2 - 0,84D - 14,12 \quad (5.2)$$

$w$  = peso estimado del tanque, toneladas

$D$  = Diámetro del tanque, m

$L$  = Altura del tanque, m

En el caso de que no se conozca las dimensiones del tanque, pero conozcamos el volumen del tanque, el peso aproximado del mismo puede obtenerse según las formulas siguientes

El peso para volúmenes de tanque inferiores a  $1500 \text{ m}^3$ :

$$w = 2,71 + 4,79E - 02 * v \quad (5.3)$$

Y para volúmenes de tanque superiores a  $1500 \text{ m}^3$ :

$$w = 12 + 2,31E - 02 * v - 1,2E - 07 * v \quad (5.4)$$

$w$  = Peso estimado del tanque, toneladas.

$v$  = volumen del tanque,  $\text{m}^3$ .

**5.1.1 Factores de ajuste** Según el tipo de diseño y material empleado, debe introducirse en los factores de ajuste de acuerdo con la siguiente escala:

**Tabla 26** Factores de ajuste

<u>Tipo de diseño</u>	<u>F<sub>d</sub></u>	<u>Material</u>	<u>F<sub>m</sub></u>
Techo cónico	1	Acero carbono	0
Techo flotante	1,15	Rubber lined	0,49
		Acero 304-316	2,15

El análisis económico será enfocado a la cantidad de energía que debe gastar un tanque para contener caliente el crudo con las dimensiones estipuladas para los diferentes percentiles analizados aprovechando los tiempos de retención hallados para aprovecharlos en el dimensionamiento más apropiado.

Como el tanque se diseñara con las dimensiones estipuladas se deberá aprovechar el tiempo de retención o residencia para enfocar en la disminución de la temperatura y bajar el costo de energía aprovechando la metodología estadística desarrollada.

Todos estos aspectos se deberán analizar a la hora de conocer el tipo de intercambiador de calor que se utilizara para introducir el crudo a la temperatura que se estipulo, para conocer los puntos importantes y hacer un análisis económico profundo del diseño.

**5.1.2 Análisis económico de la opción 1 de diseño** como se observa en la tabla 5.2 la temperatura del tanque del diseño se puede reducir a una temperatura de 150 F para retener el caudal de entrada por un tiempo de 24 horas aproximadamente generando disminución en los gastos de energía creándole utilidad las 24 horas al tanque.

**Tabla 27** cambios de tiempos de residencia con la temperatura opción 1

	Øpartícula	155,32							
	Visco cp	GRAVEDAD ESPECIFICA	Vs(ft/min)	ts hr	tr hr	Reynolds	Cd sin stokes	cd stokes	
TEMP F	22 API	AGUA	22 API	22 API	22 API	22 API	22 API	22 API	22 API
120	36,8678761	1,0051	0,9051	0,006988402	39,82032781	44,24480868	0,012858213	1893,307668	1866,511256
125	32,9421682	1,0031	0,9036	0,007782102	35,7590367	39,732263	0,015993022	1524,716692	1500,654437
130	29,5647513	1,0011	0,9021	0,00862754	32,25490353	35,8387817	0,019716589	1238,954193	1217,249072
135	26,6421618	0,9991	0,9006	0,00952561	29,21392726	32,45991918	0,024108704	1015,152313	995,4911031
140	24,0995467	0,9971	0,8991	0,010477151	26,56069957	29,51188841	0,029255979	838,224495	820,3451272
145	21,8764599	0,9951	0,8976	0,011482953	24,23422533	26,92691704	0,035252068	697,1289744	680,8107384
150	19,9237142	0,9931	0,8961	0,012543752	22,18478789	24,64976433	0,042197984	583,6916697	568,7475494
155	18,2009967	0,9911	0,8946	0,013660235	20,37157329	22,63508143	0,050202118	491,7968535	478,0674807
160	16,6750476	0,9891	0,8931	0,01483304	18,76085221	20,84539135	0,059380638	416,8233017	404,172146
165	15,3182544	0,9871	0,8916	0,016062758	17,32457613	19,24952903	0,069857584	355,2465988	343,5561124
170	14,1075588	0,9851	0,8901	0,017349931	16,03928399	17,82142666	0,081765063	304,3553918	293,5238971
175	13,0236002	0,9831	0,8886	0,018695056	14,88524409	16,5391601	0,09524342	262,0467498	251,9859105
180	12,0500383	0,9811	0,8871	0,020098583	13,84577548	15,38419498	0,110441391	226,6770769	217,30983
185	11,1730147	0,9791	0,8856	0,021560919	12,90670755	14,34078617	0,127516246	196,9524582	188,2113129
190	10,3807221	0,9771	0,8841	0,023082423	12,05594693	13,39549659	0,146633914	171,8472834	163,6729141
195	9,66305692	0,9751	0,8826	0,024663415	11,28312804	12,53680894	0,167969105	150,5433428	142,8834191
200	9,01133775	0,9731	0,8811	0,026304168	10,57932971	11,75481078	0,191705405	132,3838787	125,1920882

El precio del tanque de la opción 1 de diseño quedaría de la siguiente manera:

- Se debe tener en cuenta que el tanque se diseñara con acero al carbón con techo cónico

En la tabla 28 se mostrara el costo del tanque en peso:

**Tabla 28** precio del tanque opción 1

Dimensiones del tanque L(ft)xD(in)	Peso del tanque (ton)	Precio pesos colombianos
Real 33,48007181x803,55866288	Real 1052,1165	\$3.787'619.400,81
Aproximado 33,5x804	Aproximado 1053,87922	\$3.793'965.197,51

Nota: \$3.600/kg de acero al carbón. 2011

- Este tanque con estas dimensiones y los análisis preliminares tendrá la capacidad de enviar el crudo con un 100% de BSW desalojado.

- El crudo deberá entrar al tanque 180 F para separar eficazmente el volumen de agua en crudo.
- Este diseño es viable porque los gastos de aumento de temperatura son conocidos y se puede disminuir este costo si se disminuye la temperatura como lo muestra la tabla 28 para cumplir con el tiempo de residencia deseado y ajustar a la demanda de crudo a la cual se esté estipulando en el campo.

**5.1.3 Análisis económico de la opción 2 de diseño** se observa que en este diseño las opciones son casi iguales que la anterior la diferencia es que la entrada del aceite debe estar en 165 F en el anterior es 180 F pero para que el tanque trabaje las 24 horas del día hay que bajar la temperatura a 150 para un promedio de 24 horas de tiempo de retención.

Si se desea que el tanque trabaje menos tiempo se debe aumentar a 190 F y tendrá un tiempo de retención de 13 horas aproximadamente aumentado casi a al 50% de eficiencia del tiempo de retención.

**Tabla 29** cambios de tiempo de residencia con la temperatura opción 2

	Øparticula	167,47							
	Viscosidad c <sub>p</sub>	GRAVEDAD ESPECIFICA	Vs(ft/min)	ts hr	tr hr	Reynolds	Cd sin stokes	cd stokes	
TEMP F	22 API	AGUA	22 API	22 API	22API	22 API	22API	22 API	
120	36,86787608	1,0051	0,9051	0,00812451	39,05106847	43,39007607	0,014948579	1630,380786	1605,503795
125	32,94216816	1,0031	0,9036	0,009047242	35,06823442	38,96470491	0,018593015	1313,148519	1290,80732
130	29,5647513	1,0011	0,9021	0,010030123	31,63179499	35,14643888	0,022921924	1067,187606	1047,032531
135	26,64216184	0,9991	0,9006	0,011074192	28,64956509	31,8328501	0,028028066	874,5439966	856,2845461
140	24,09954667	0,9971	0,8991	0,012180427	26,04759313	28,94177015	0,034012137	722,2373512	705,6304699
145	21,87645994	0,9951	0,8976	0,013349742	23,76606233	26,40673592	0,040983035	600,767171	585,6081609
150	19,9237142	0,9931	0,8961	0,014582995	21,75621645	24,17357383	0,049058129	503,1001466	489,2155597
155	18,20099675	0,9911	0,8946	0,015880985	19,97802999	22,1978111	0,058363498	423,9738956	411,2159259
160	16,67504765	0,9891	0,8931	0,017244454	18,39842524	20,44269471	0,069034175	359,4118757	347,6538982
165	15,31825439	0,9871	0,8916	0,018674087	16,98989551	18,87766168	0,081214362	306,3812381	295,514233
170	14,10755885	0,9851	0,8901	0,020170517	15,72943297	17,47714775	0,095057646	262,5487095	252,4783759
175	13,02360025	0,9831	0,8886	0,021734319	14,59768711	16,21965235	0,110727185	226,104529	216,7489396
180	12,05003828	0,9811	0,8871	0,023366019	13,57829922	15,08699914	0,128395897	195,6341779	186,9218605
185	11,17301466	0,9791	0,8856	0,025066087	12,65737245	14,06374717	0,148246618	170,0240344	161,8923948
190	10,38072209	0,9771	0,8841	0,026834943	11,82304704	13,13671894	0,170472254	148,3913571	140,7853737
195	9,663056915	0,9751	0,8826	0,028672957	11,06515767	12,29461963	0,195275916	130,0318817	122,9030207
200	9,011337751	0,9731	0,8811	0,030580449	10,37495549	11,52772832	0,222871038	114,3802847	107,6855937

El precio del tanque de la opción 2 de diseño quedaría de la siguiente manera:

**Tabla 30** precio del tanque opción 2

Dimensiones del tanque L(ft)xD(in)	Peso del tanque (ton)	Precio pesos colombianos
Real 33,48007181x803,55866288	Real 1052,1165	\$3.787'619.400,81
Aproximado 33,5x804	Aproximado 1053,87922	\$3.793'965.197,51

Nota: \$3.600/kg de acero al carbón. 2011

- Este tanque con estas dimensiones y análisis preliminares tendrá la capacidad de de desalojar el 99,97409122% del BSW.
- El tanque debe trabajar a 165 F para separar eficazmente el volumen de agua estipulado del crudo.

### 5.1.4 Análisis económico de la opción 3 de diseño

En este caso los tiempos son cortos en comparación con los anteriores pero la diferencia de este caso, el percentil estipula que al sedimentarse los tamaños de partícula de este diámetro solo se han sedimentado el 81,4568% de BSW generando gastos en químicos y aumentos drásticos de temperatura.

**Tabla 31** cambios de tiempo de residencia con la temperatura opción 3

	Øpartícula	199,85							
	Viscosidad c	GRAVEDAD ESPECIFICA		Vs(ft/min)	ts hr	tr hr	Reynolds	Cd sin stokes	cd stokes
TEMP F	22 API	AGUA	22 API	22 API	22API	22 API	22API	22 API	22 API
120	36,86787608	1,0051	0,9051	0,011569949	26,21298859	29,5572017	0,021287966	1148,298982	1127,397512
125	32,94216816	1,0031	0,9036	0,012883992	23,53951543	26,54265091	0,026477933	925,1916796	906,4151487
130	29,5647513	1,0011	0,9021	0,014283693	21,23280909	23,94165849	0,032642644	752,1791627	735,2345561
135	26,64216184	0,9991	0,9006	0,015770531	19,2309904	21,68445083	0,039914197	616,6459206	601,2898067
140	24,09954667	0,9971	0,8991	0,017345897	17,48441947	19,71505503	0,04843599	509,4706148	495,4993183
145	21,87645994	0,9951	0,8976	0,019011095	15,95294432	17,98819662	0,058363105	423,9767116	411,2187
150	19,9237142	0,9931	0,8961	0,020767346	14,60383739	16,46697268	0,069862681	355,2211225	343,5310501
155	18,20099675	0,9911	0,8946	0,022615787	13,4102316	15,12108849	0,083114267	299,5050794	288,759088
160	16,67504765	0,9891	0,8931	0,024557475	12,34992357	13,92550798	0,09831016	254,033347	244,1253275
165	15,31825439	0,9871	0,8916	0,026593387	11,40444947	12,85941174	0,115655716	216,6738444	207,5124406
170	14,10755885	0,9851	0,8901	0,028724422	10,55836532	11,90538547	0,135369654	185,7861303	177,2923201
175	13,02360025	0,9831	0,8886	0,030951401	9,798882108	11,04878303	0,157684326	160,0976962	152,2028262
180	12,05003828	0,9811	0,8871	0,033275071	9,114419058	10,27722274	0,182845978	138,6138363	131,2580145
185	11,17301466	0,9791	0,8856	0,035696103	8,496247934	9,580186287	0,211114984	120,5513513	113,6821249
190	10,38072209	0,9771	0,8841	0,038215095	7,93620788	8,948697177	0,242766059	105,2893449	98,86060716
195	9,663056915	0,9751	0,8826	0,040832574	7,427475437	8,375061425	0,278088448	92,33239632	86,30347693
200	9,011337751	0,9731	0,8811	0,043548993	6,96417795	7,852657151	0,317386098	81,28277316	75,61767883

Se observa que se puede reducir la temperatura a hasta 120F para un promedio de 24 horas de tiempo de retención y aumentando la temperatura a 200 F el tiempo promedio de retención es de 8 horas.

El precio del tanque de la opción de diseño 3 es:

**Tabla 32** precio del tanque opción 3

Dimensiones del tanque L(ft)xD(in)	Peso del tanque (ton)	Precio pesos colombianos
Real 33,48007181x803,55866288	Real 1052,1165	\$3.787'619.400,81
Aproximado 33,5x804	Aproximado 1053,87922	\$3.793'965.197,51

Nota: \$3.600/kg de acero al carbón. 2011

- Este tanque con estas dimensiones y análisis preliminares tendrá la capacidad de desalojar el 81,45677995% de BSW. Esto creará gasto en rompedores y desmulsificantes.
- Este tanque deberá trabajar a 145 F, pero con el dato del BSW retirado el gasto económico del aumento en temperatura aumentara a medida que aumenta el tiempo generando gastos mensuales del tanque dependiendo del intercambiador que se utilice para dicho aumento en temperatura.

**5.1.5 Análisis económico de opción 4 de diseño** en este caso los tiempos de residencia son cortos a comparación de los anteriores y además este tamaño de partícula esta fuera de la distribución de partícula hallada generando incertidumbre de cuanto BSW sedimentaria cuando esta partícula sedimente.

Se debe tener en cuenta que no tendría la certeza de cuánto tiempo tomaría en realidad en sedimentarse si se dejara solo el crudo en el tanque sin necesidad de químicos por lo que hace necesario hacer un estudio con el tanque diseñado y montado generando gastos a largo plazo en la parte de investigación.

Este estudio podría variar dependiendo el tipo de crudo que se esté tratando, entonces estos detalles no serían viables para la empresa que diseñe tanques con este tipo de diámetro de partícula asumido.

**Tabla 33** cambios de tiempo de residencia con la temperatura opción 4

	Øpartícula	500							
	Visco cp	GRAVEDAD ESPECIFICA		Vs(ft/min)	ts hr	tr hr	Reynolds	Cd sin stokes	cd stokes
TEMP F	22 API	AGUA	22 API	22 API	22API	22 API	22API	22 API	22 API
60	249,3956345	1,0291	0,9231	0,011348234	19,98327565	22,20363961	0,003160375	7647,740482	7594,036042
65	199,993075	1,0271	0,9216	0,014084738	16,1007533	17,88972588	0,004881891	4959,403972	4916,127417
70	163,0232704	1,0251	0,9201	0,017196931	13,18693907	14,65215452	0,007298089	3323,988948	3288,532008
75	134,7755247	1,0231	0,9186	0,020702201	10,9541438	12,17127089	0,01060633	2292,269465	2262,799586
80	112,7996654	1,0211	0,9171	0,024617094	9,212089939	10,23565549	0,015039688	1620,580326	1595,77777
85	95,43168642	1,0191	0,9156	0,028957363	7,831337593	8,701486214	0,020870113	1171,076124	1149,969836
90	81,51342746	1,0171	0,9141	0,033738	6,721645857	7,468495397	0,028411581	862,8640415	844,7259453
95	70,22120736	1,0151	0,9126	0,038973269	5,818728908	6,465254342	0,038023225	646,9181501	631,1931756
100	60,95789979	1,0131	0,9111	0,044676736	5,075905418	5,639894909	0,050112415	492,6645863	478,9232351
105	53,28315211	1,0111	0,9096	0,050861293	4,458692932	4,954103258	0,065137813	380,5440958	368,4495821
110	46,86719589	1,0091	0,9081	0,05753918	3,941225585	4,379139539	0,083612359	297,7538542	287,0389041
115	41,45962332	1,0071	0,9066	0,064722006	3,503829682	3,893144091	0,106106208	235,738277	226,188463
120	36,86787608	1,0051	0,9051	0,072420771	3,131351468	3,479279409	0,133249588	188,6715476	180,1131279
125	32,94216816	1,0031	0,9036	0,080645876	2,811983682	3,124426314	0,165735594	152,5180472	144,8089657
130	29,5647513	1,0011	0,9021	0,089407145	2,536429132	2,818254591	0,204322895	124,4380001	117,4611389
135	26,64216184	0,9991	0,9006	0,098713836	2,297295854	2,552550949	0,24983835	102,4040544	96,06211363
140	24,09954667	0,9971	0,8991	0,108574656	2,088653965	2,320726628	0,303179536	84,9494449	79,16101568
145	21,87645994	0,9951	0,8976	0,118997772	1,905706899	2,117452211	0,365317174	70,99981576	65,69633652
150	19,9237142	0,9931	0,8961	0,129990823	1,74454536	1,938383734	0,437297453	59,75917543	54,88255148
155	18,20099675	0,9911	0,8946	0,141560929	1,601959587	1,779955097	0,520244244	50,63145267	46,13217789
160	16,67504765	0,9891	0,8931	0,153714703	1,4752973	1,639219222	0,615361196	43,16582169	39,00148429

El precio del tanque de la opción de diseño 4 con diámetro de partícula asumido es:

**Tabla 34** precio del tanque opción 4

Dimensiones del tanque L(ft)xD(in)	Peso del tanque (ton)	Precio pesos colombianos
Real 49,54092371x660,5849984	Real 1052,1165	\$3.787´619.400,81
Aproximado 50x661	Aproximado 1063,07425	\$3.827´067.400,81

Nota: \$3.600/kg de acero al carbón. 2011

- Este tanque con estas dimensiones y análisis preliminares dará la información de cuánto porcentaje de BSW se desalojara a causa del dato del diámetro de partícula de esta opción de diseño no se encuentra dentro de la distribución de partícula hallada con la metodología. Esto generaría gastos económicos en rompedores, desmulsificadores y aumentos en temperaturas sin tener la certeza de cuanto de estos implementos se debe utilizar y su costo total mensual.
- La temperatura a la cual debe llegar el crudo a este tanque es de 85 F para cumplir con la separación, pero con los datos anteriores genera una grande incertidumbre en este diseño y la poca eficiencia de este
- se debe contemplar que la adición de estos gastos son mensuales, sumados al costo de fabricación generando a largo plazo una inversión económica innecesaria.
- Como la relación de esbeltez RE es igual a 0,9 la altura del tanque con respecto a al diámetro es alta a comparación de las anteriores opciones ocasionando que las gotas más pequeñas de la distribución tengan un tiempo de residencia de 90,17 horas a 85 F, generando la no viabilidad del diseño.
- La viabilidad de este diseño es poco útil para la industria, lo cual no es recomendable diseñarlo de esta manera.

## 5.2 DECISIÓN DE DISEÑO

Para tomar la decisión de diseño se debe tomar en cuenta todos los conceptos económicos enunciados en cada opción dejando en evidencia cual de las opciones es la más óptima a la hora de diseñar.

La viabilidad del diseño depende del correcto funcionamiento del mismo y para ello se concentra cual de las cuatro opciones reduciría gastos en la industria y para ello la decisión se concentra en la opción de diseño 2 porque esta opción

cumple con las condiciones de entrega del crudo que es del 0.1% de BSW y la temperatura de trabajo es de 165 F generando bajos costos en químicos y calentamiento de la emulsión.

## CONCLUSIONES

- Esta metodología se apoya sobre la simulación Montecarlo (crystal ball) que permite profundizar la estimación del tamaño de partícula, indicando detalladamente un rango de valores ajustados a una distribución conocida con el fin de interpretar la medición propuesta rápida y eficazmente.
- Es necesario tener precaución con las variables que afectan la tensión interfacial de la fase dispersa, ya que si se altera podríamos cambiar el tamaño de partícula inicial en la fase y además facilitar la coalescencia lo cual permitiría hacer una medición o estudio errado.
- La teoría y los textos hacen referencia a tamaños de partícula representativos o promedios en una emulsión. Se debe reconsiderar esta afirmación debido a que el tamaño de partícula depende de la naturaleza de la emulsión y a las condiciones de producción donde se podría formar una emulsión más apretada, por ende no hay un tamaño de partícula promedio o una tendencia modal de las partículas de agua.
- La aplicación de este estudio facilita hacer un análisis de sensibilidad, de la influencia que tiene el tamaño de partícula sobre el diseño de separadores liquido-liquido cuando tenemos en cuenta los percentiles.
- Es importante hacer un diseño de separador óptimo, el cual garantice retirar el 100 % de BSW, debido al impacto económico que representa el tratamiento durante la etapa de deshidratación del crudo no agregar químico ni solvente.

- Tratar un crudo a temperatura y presión ambiente hace que el diseño tenga dimensiones más grandes y por ende se incrementen los costos de fabricación.
- Al asumir el diámetro de partícula genera un rango de incertidumbre alta a causa de que en algunos casos ese tamaño de partícula no se encuentre dentro de la distribución de partícula hallada generando problemas de separación y ajustes de temperatura, ocasionando la utilización de químicos para terminar la separación y esto pone en tela de juicio la viabilidad del diseño.
- Los percentiles de la estadística muestran claramente cuanto % de BSW se puede retirar creando criterios de decisión para conocer cual percentil es adecuado para diseñar correctamente el sistema de separación.

## RECOMENDACIONES

- Para crudos que están expuestos a tratamientos desde fondo de pozo con químico y solvente, es prescindible aplicar esta metodología teniendo un previo conocimiento en que cantidades están presentes dichos compuestos. Pues se podrá estudiar el diámetro de partícula pero no se medirá un diámetro de distribución inicial sino aparente debido a las condiciones de tratamiento forzado.
- Para el proceso centrifugación es importante tener guía de la norma ASTM 4007-08, aunque es conveniente hacer mediciones a prueba y error y definir propios parámetros de estudio.
- Es recomendable no generar una sedimentación de partículas de agua antes de ser llevada al equipo de centrifugación debido a que posteriormente no permitirá generar y mostrar una distribución estadística.
- Se recomienda analizar los datos reológicos a la hora de conocer la distribución de tamaño de partícula y velocidad de sedimentación para conocer si cumple con la ley de Stokes y proseguir con el proceso de demostración de la ecuación de diseño.
- Se debe hacer énfasis en el tamaño de partícula de diseño porque este dato genera sobre diseño en los tanques a la hora de diseñar.

## BIBLIOGRAFIA

BARRIENTOS, Jorge. Diseño conceptual de separadores. Curso para ingenieros Bucaramanga, diciembre 2 del 2005.

DUARTE DUARTE, Jesús Hernando. Diseño de un proceso para deshidratar emulsiones de crudos pesados. Tesis de grado Bucaramanga, 2003

CARRILLO ACEVEDO, Rafael; SANDOVAL SANDOVAL, Arturo. Estudio y análisis del tratamiento de los crudos pesados del campo castilla. tesis de grado Bucaramanga, 1983

EVERT O, Grodal; MATTHEW J, Realf. O Optimal design of two and three phase separators: a mathematical programming formulation. SPE 56645, 1999

H. MINHAS, E. MATTEO, K.M. EIKELAND, M. MENGOLI, and S. BESWETHERICK, Eni Agip SpA. Probabilistic reserve estimation constrained by limited production data: an integrated approach. IPTC 10957, 2005

RONALD E. WALPOL. Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias (8 Edición). Biblioteca UIS.

MURRAY R. SPIEGEL; JOHN J. CHILLER; R. ALU SRINIVASAN. Teoría y Problemas de Probabilidad y Estadística. Biblioteca UIS.

MILLER Irwin; FREUND John. Probabilidad y estadística para ingenieros. Biblioteca UIS.

SUSAN Milton; JESSE C. Arnold. Probabilidad y Estadística: con aplicaciones para ingeniería y ciencias computacionales. Biblioteca UIS.

ARNOLD Ken; STEWART Maurice. Surface Production Operations. Design of oil handling systems and facilities.

GPSA.

NORMA API 650

NORMA ASTM 4007-08

NOMRA ASTM D 341

[http://personal.us.es/leonwas/docs/apoyo\\_docencia/tema-08.pdf](http://personal.us.es/leonwas/docs/apoyo_docencia/tema-08.pdf)

<http://www.textoscientificos.com/emulsiones/introduccion>

<http://www.elergonomista.com/galenica/forma.htm>

[http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/es/Particle\\_size\\_distribution](http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/es/Particle_size_distribution)

<http://www.extension.org>

[http://personal5.iddeo.es/ztt/Tem/t21\\_distribucion\\_normal.htm](http://personal5.iddeo.es/ztt/Tem/t21_distribucion_normal.htm)

<http://www.autitex.com>

[http://www.ingenieria.unam.mx/~jagomez/materias/ARCHIVOS\\_CONDUCCION/CAPITULO%20VII.pdf](http://www.ingenieria.unam.mx/~jagomez/materias/ARCHIVOS_CONDUCCION/CAPITULO%20VII.pdf)

<http://www.oilproduction.net/files/NOTATECNICA36.pdf>

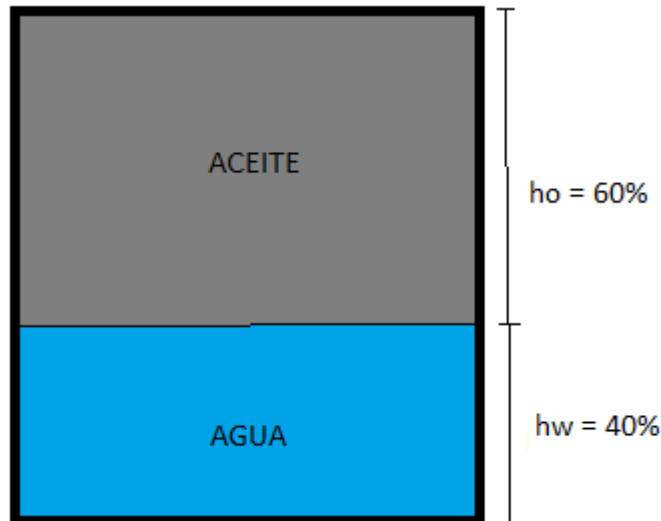
**ANEXO A. HOJA DE CALCULO DE EXCEL PARA LAS PROPIEDADES  
DE LA EMULSION DE 22 API**

	Øparticula	155,32						
	Visco cp	(SG)ρ	Vs(ft/min)	ts hr	tr hr	Reynolds	Cd sin stokes	cd stokes
TEMP F	22 API	22 API	22 API	22API	22 API	22API	22 API	22 API
120	36,86787608	0,9051	0,006988402	39,82032781	44,24480868	0,012858213	1893,307668	1866,511256
125	32,94216816	0,9036	0,007782102	35,7590367	39,732263	0,015993022	1524,716692	1500,654437
130	29,5647513	0,9021	0,00862754	32,25490353	35,8387817	0,019716589	1238,954193	1217,249072
135	26,64216184	0,9006	0,00952561	29,21392726	32,45991918	0,024108704	1015,152313	995,4911031
140	24,09954667	0,8991	0,010477151	26,56069957	29,51188841	0,029255979	838,224495	820,3451272
145	21,87645994	0,8976	0,011482953	24,23422533	26,92691704	0,035252088	697,1289744	680,8107384
150	19,92371142	0,8961	0,012543752	22,18478789	24,64976433	0,042197984	583,6916697	568,7475494
155	18,20099675	0,8946	0,013660235	20,37157329	22,63508143	0,050202118	491,7968535	478,0674807
160	16,67504765	0,8931	0,01483304	18,76085221	20,84539135	0,059380638	416,8233017	404,172146
165	15,31825439	0,8916	0,016062758	17,32457613	19,24952903	0,069857584	355,2465988	343,5561124
170	14,10755885	0,8901	0,017349931	16,03928399	17,82142666	0,081765063	304,3553918	293,5238971
175	13,02360025	0,8886	0,018695056	14,88524409	16,5391601	0,09524342	262,0467498	251,9859105
180	12,05003828	0,8871	0,020098583	13,84577548	15,38419498	0,110441391	226,6770769	217,30983
185	11,17301466	0,8856	0,021560919	12,90670755	14,34078617	0,127516246	196,9524582	188,2113129
190	10,38072209	0,8841	0,023082423	12,05594693	13,39549659	0,146633914	171,8472834	163,6729141
195	9,663056915	0,8826	0,024663415	11,28312804	12,53680894	0,167969105	150,5433428	142,8834191
200	9,011337751	0,8811	0,026304168	10,57932971	11,75481078	0,191705405	132,3838787	125,1920882
205	8,418076088	0,8796	0,028004915	9,936843837	11,0409376	0,218035368	116,8386576	110,0738847
210	7,876788435	0,8781	0,029765846	9,348985805	10,38776201	0,247160587	103,4772265	97,10286053
215	7,381841623	0,8766	0,031587109	8,809938078	9,788820086	0,279291751	91,94829735	85,93164629
220	6,928324844	0,8751	0,033468811	8,314620743	9,238467492	0,314648695	81,9637508	76,27554282
225	6,511943304	0,8736	0,03541102	7,858583776	8,731759751	0,353460421	73,28614785	67,90010587
230	6,128929474	0,8721	0,037413764	7,437917024	8,264352249	0,395965118	65,71892246	60,61139954
235	5,775968705	0,8706	0,039477029	7,049174682	7,832416313	0,44241016	59,09863611	54,24830205
240	5,450136646	0,8691	0,041600763	6,689311664	7,432568515	0,493052085	53,28882795	48,67639894
245	5,148846386	0,8676	0,043784877	6,355629817	7,061810908	0,548156567	48,17510671	43,78311131
250	4,86980366	0,8661	0,046029241	6,045732271	6,717480302	0,607998366	43,66121428	39,47379029

- Columna 1: Son las diferentes temperaturas desde 120 a 250 F
- Columna 2: Es la variación de la viscosidad en cp. con los cambios de temperatura
- Columna 3: La gravedad específica del aceite
- Columna 4 : Velocidad de asentamiento
- Columna 5: Tiempo de sedimentación en horas
- Columna 6: Tiempo de residencia en horas
- Columna 7: Número de Reynolds
- Columna 8: Coeficiente de arrastre con Stokes
- Columna 9: Coeficiente de arrastre sin Stokes
- En la parte superior se encuentra el diámetro de partícula con el cual se halla los diferentes datos de importancia para el diseño.

## **ANEXO B. ECUACION DE DIAMETRO MINIMO DEL SISTEMA DE SEPARACION**

## 1. Demostración de diámetro mínimo de un tanque de lavado Gun Barrel



- Velocidad de sedimentación en unidades de campo para hallar el tiempo de sedimentación.

$$v_s = \frac{1.78 * 10^{-6} (\Delta SG) d_m^2}{\mu}$$

- El tiempo de sedimentación para colocarlo en función de la altura de aceite

$$t_s = \frac{h_o \text{ altura de aceite}}{v_s \text{ velocidad de sedimentacion}}$$

- Conocer el tiempo de residencia

$$tr = \frac{v_o, \text{ volumen de aceite}}{Q_e, \text{ caudal de la emulsion}}$$

- Relación de esbeltez

$$RE = \frac{h}{D}$$

- Hacer los ajuste de estas ecuaciones y igualarlas para generar la ecuación de diámetro mínimo de diseño

$$dmin^2 = 7734 \frac{Qo\mu}{\Delta(SG)dm_w}$$