

**EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS BASADAS EN SISTEMAS DE MICRO-  
BURBUJAS PARA SEPARACIÓN DE RESIDUOS ACEITOSOS EN AGUAS DE  
PRODUCCIÓN**

**GREYSSI YARENIS HASTAMORIR CHAPARRO  
MARÍA LORENA MURANDE SÁNCHEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2014**

**EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS BASADAS EN SISTEMAS DE MICRO-  
BURBUJAS PARA SEPARACIÓN DE RESIDUOS ACEITOSOS EN AGUAS DE  
PRODUCCIÓN**

**GREYSSI YARENIS HASTAMORIR CHAPARRO  
MARÍA LORENA MURANDE SÁNCHEZ**

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

**Director**

**Julio Cesar Pérez Angulo**

**Ingeniero de Petróleos – Especialista en Ingeniería de Gas**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2014**

## DEDICATORIA

Los triunfos de la vida no serían nada sin aquellas personas que te acompañan en el día a día, las cuales hacen únicos cada uno de los pasos recorridos...

A mi mamá primero que nada, por ser la mujer más valiente que he podido conocer, que me ha enseñado a superar las dificultades y a pesar de todo sonreírle a la vida por cada nueva oportunidad que nos da. A mi papá, que me regaló la humildad y la bondad, además de aprender a soñar para tener un propósito en la vida.

A mi hermanito Leo, por ser uno de mis ejemplos a seguir, por siempre contar con su apoyo y sus palabras oportunas, por compartir conmigo sus muchos conocimientos y sus arrebatos de vivir. A mi hermanita y mi mejor amiga, la que siempre me ha escuchado y me ha regalado una palabra de apoyo, y ahora me regala una nueva luz en mi vida... Amélie ☺. A mis angelitos de la guarda, que llegaron cada uno en un momento oportuno siempre para alegrarnos la vida.

A mis amigos de siempre en la universidad, Víctor, Leidy, Cristian, Fanny, Flako, Jhon, Andrés B., con los que compartí tristezas, alegrías, estudio y fiesta, que sin su apoyo incondicional esta universidad no habría sido lo mismo. A todos aquellos amigos y compañeros de estudio que han estado a lo largo de mi vida universitaria y que aportaron un granito de arena para hacer única esta experiencia.

A Gradex Ingeniería y todos mis compañeros y amigos de trabajo, con los que crecí durante estos últimos años no solamente en el área profesional, sino además como persona. Gracias por ese infinito apoyo y comprensión, por creer en mí!

Y a todos aquellos que ya no están por alguna razón, pero finalmente, algo me enseñaron para ser la persona que hoy soy...

Mis infinitas gracias!

GREYSSI

*"Haz sólo lo que amas y serás feliz, y el que hace lo que ama, está benditamente condenado al éxito, que llegará cuando deba llegar, porque lo que debe ser será, y llegará naturalmente. No hagas nada por obligación ni por compromiso, sino por amor..."*

*Facundo Cabral*

## DEDICATORIA

Queridos tíos y tías.....

Llego el momento tan esperado con bellos recuerdos y momentos vividos en el pasar de estos años, que tuve el placer de compartir este sueño con personas especiales, seres queridos y demás.

Dedico este triunfo principalmente a DIOS por sus bendiciones, por ser mi guía, luz y darme serenidad para seguir adelante en cada meta alcanzada y sueño anhelado.

A mi hija MARIA FERNANDA, por ser mi vida, motor, fortaleza, motivación y gran amor... TE AMO PEQUEÑA, ESTE ES NUESTRO LOGRO!!!!!!!

A mis padres y abuelita, STELLA, MANUEL y DORA, por su gran amor, confianza, apoyo y esfuerzo.

A mis lindos hermanos, GIGLIOLA, DOMENICO Y SILVANA por su comprensión, lealtad, consejos y lindos detalles.

A mis hijitos bellos, ALEJANDRA, JUANFE Y FRANCESCA que han sido gran motivación, gracias por su desinteresado amor, cariño, lindo apoyo y buenos deseos.

A mis tías, PATY Y NUBIA por esos corazones bondadosos y confianza.

A mis primos, NANIS por su cariño y ánimo; NATYS por su tiempo y colaboración y CARLITOS por su aprecio y detalles.

A mi compañera GREYSSI, por su paciencia y esfuerzo.

A JOSE que aunque llego al final de esta etapa ha sido un apoyo.

A las personas que aun sin ser mi familia me adoptaron como una de ella brindándome su confianza y cariño, DOMINGA, MILLER, Sra. NOHORA, CARITO.

A todos aquellos que estuvieron en este proceso, momentos buenos y malos, por su amistad en especial a TATI, OSCAR, ANITA, ANGELA, ISA, TATA, MARIANA, ANDREITA, CARO, LUZ, LA FLACA, JHON JAIRO, MARIAN, TAVITO, BEBE, PIPE, DANI, MATEO.

LORENA

## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestros agradecimientos van dirigidos a aquellas personas que aportaron a nuestra formación profesional y este trabajo de grado:

Al ingeniero Julio Cesar Pérez por su apoyo y colaboración.

Al ingeniero Erick Montes por su dedicación y consejos.

A nuestros profesores de la Escuela por brindarnos sus conocimientos y ser guías de nuestra formación profesional.

Al ingeniero Cesar Pineda por su amistad, acompañamiento y enseñanzas a nivel personal y profesional.

A todas aquellas personas q contribuyeron de una u otra manera en este proceso de aprendizaje, desempeño y lucha.

# CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>21</b>
<b>1 ASPECTOS GENERALES AGUA DE PRODUCCIÓN .....</b>	<b>23</b>
<b>1.1 GENERALIDADES .....</b>	<b>23</b>
1.1.1 Ciclo del Agua Asociada a la Producción de Petróleo. ....	24
<b>1.2 PROBLEMAS Y CONTAMINANTES MÁS COMUNES DEL AGUA DE PRODUCCIÓN.....</b>	<b>26</b>
1.2.1 Contenido de aceite. ....	26
1.2.2 Gases ácidos (O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S disuelto) con una tendencia corrosiva. ....	27
1.2.3 Formación de incrustaciones. ....	28
1.2.4 Formación de sólidos. ....	29
1.2.4.1 Sólidos disueltos .....	29
1.2.4.2 Sólidos en suspensión .....	29
1.2.5 Corrosión. ....	30
1.2.6 Bacterias. ....	30
1.2.7 Formación de escamas. ....	31
<b>1.3 TRATAMIENTOS.....</b>	<b>31</b>
1.3.2 Remoción del petróleo disperso.....	33
1.3.2.2 Tanques desnatadores .....	34
1.3.2.3 Separador de placas paralelas .....	35
1.3.2.4 Celdas de flotación.....	36
1.3.2.5 Coalescedores .....	37
1.3.2.6 Hidrociclones .....	38
1.3.3 Remoción de gas disuelto.....	39

1.3.3.1	Remoción de oxígeno .....	39
1.3.3.2	Remoción de gases ácidos .....	41
1.3.3.3	Remoción de CO <sub>2</sub> .....	42
1.3.4	Remoción de sólidos en suspensión.....	42
1.3.4.1	Filtros de lecho graduado convencionales .....	43
1.3.4.2	Filtros de alta velocidad, lecho profundo y flujo ascendente. ....	43
1.3.4.3	Filtros de alta velocidad, lecho profundo y flujo descendente .....	44
1.3.4.4	Filtros de Tierra Diatomácea (TD).....	44
1.3.4.5	Filtros cartucho .....	45
1.3.4.6	Sedimentación .....	46
1.3.5	Biocidas .....	46
1.3.5.1	Bacterias .....	46
1.3.5.2	Control químico.....	47
<b>1.4</b>	<b>NORMATIVA EXISTENTE EN COLOMBIA PARA EL VERTIMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN.....</b>	<b>48</b>
1.4.1	Marco legal y reglamentario de los instrumentos de control de los vertimientos.....	49
1.4.2	Legislación Vigente.....	50
1.4.3	Normas de calidad de los Vertimientos.....	51
<b>2</b>	<b>MICROBURBUJAS .....</b>	<b>54</b>
<b>2.1</b>	<b>GENERALIDADES.....</b>	<b>54</b>
2.1.1	Características de las Microburbujas. ....	55
2.1.1.1	Alta área interfacial específica. ....	56
2.1.1.2	Baja velocidad de elevación.....	56
2.1.1.3	Alta presión interna. ....	57
2.1.2	Métodos de Generación de Microburbujas. ....	57
2.1.3	Áreas de Aplicación. ....	58
<b>2.2</b>	<b>FLOTACIÓN .....</b>	<b>59</b>

2.2.1	Teoría de la Flotación .....	61
2.2.1.1	Velocidad de Elevación.....	63
2.2.1.2	Solubilidad del Gas. ....	66
2.2.1.3	Tamaño de Burbuja.....	69
2.2.1.4	Relación Sólidos/Aire. ....	72
2.2.2	Tipos de Flotación.....	74
2.2.2.1	Flotación Espumosa.....	75
2.2.2.2	Electroflotación. ....	76
2.2.2.3	Flotación con Aire Inducido (Disperso). ....	78
2.2.2.4	Flotación con Aire Disuelto. ....	82
2.2.2.5	Diferencias entre los sistemas DAF - IAF .....	86
<b>2.3</b>	<b>DESARROLLOS ACTUALES Y FUTUROS .....</b>	<b>87</b>
2.3.1	Técnicas en Desarrollo. ....	87
2.3.1.1	. Flotación de partículas adsorbentes. ....	87
2.3.1.2	Flotación de Agregados Coloidales (FAC) .....	88
2.3.2	Nuevos sistemas de flotación. ....	89
2.3.2.1	Cilindro aireado o cámara de burbujas, BC, o “bubble chamber”. ....	89
2.3.2.2	Separador centrífugo .....	90
2.3.2.3	Flotación Jet-Jameson Modificada.....	91
2.3.2.4	Flotación Columnar.....	92
2.3.2.5	Celda FF: Flocculación – Flotación.....	93
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN.....</b>	<b>94</b>
<b>3.1</b>	<b>ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA .....</b>	<b>95</b>
<b>3.2</b>	<b>IDENTIFICACIÓN DE FACTORES Y CRITERIOS DE EVALUACIÓN</b>	<b>96</b>
3.2.1	Identificación de Factores. ....	96
3.2.2	Criterios para Clasificación de Factores.....	97
<b>3.3</b>	<b>CONSTRUCCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DE EVALUACIÓN</b>	<b>97</b>
3.3.1	Determinación Tipo de Evaluación.....	97

3.3.1.1	Determinación de pesos ponderados de cada factor ( $\alpha_{ij}$ ).....	98
3.3.1.2	Rendimiento del Factor $W_j$ - Escala para la evaluación apreciativa.....	99
3.3.2	Grados de Importancia.....	100
<b>3.4</b>	<b>APLICACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL.....</b>	<b>101</b>
3.4.1	Búsqueda y Recolección de Información.....	101
3.4.2	Selección de Tecnologías.....	101
<b>4</b>	<b>APLICACIÓN DE MODELO CONCEPTUAL .....</b>	<b>102</b>
<b>4.1</b>	<b>SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS.....</b>	<b>102</b>
4.1.1	Alternativas de Evaluación.....	102
4.1.1.1	Sistema de remoción de hidrocarburos en agua de proceso de alta especificación. ....	102
4.1.1.2	Remoción de petróleo/aceite en agua de proceso (efluentes secundarios). ....	104
4.1.1.3	Remoción Secundaria de petróleo del Agua de Producción.....	105
4.1.1.4	Unidad DAF con tecnología Nikuni .....	106
4.1.1.5	Sistema de flotación con aire disuelto con mejora en el sistema de inyección de agua. ....	108
4.1.1.6	Purificación de aguas industriales residuales por flotación.....	109
4.1.1.7	Equipo y metodología para generar microburbujas.....	110
4.1.1.8	Boquilla para dispersión de agua.....	111
4.1.2	Pesos Ponderados.....	112
4.1.3	Selección de la Mejor Tecnología Basada en el Sistema de Microburbujas. ....	114
<b>4.2</b>	<b>VARIACIONES IDENTIFICADAS DE SISTEMAS DE FLOTACIÓN..</b>	<b>114</b>
4.2.1	Bomba Onyx® - EXTERRAN.....	115
4.2.2	Reactor Gas Líquido (GLR®) – EXTERRAN. ....	116
4.2.3	Sistema DAF World Water Works (WWW). ....	116
4.2.4	Sistema G & G Corea Co Ltd.....	117

<b>5</b>	<b>ANÁLISIS DE COSTOS</b> .....	<b>118</b>
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>123</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>124</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>125</b>

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Equipos para tratamiento de aguas de producción.....	32
Tabla 2. Marco jurídico Nacional.....	49
Tabla 3. Normas de calidad de agua de los vertimientos .....	52
Tabla 4. Concentraciones para el control de la carga máxima permisible .....	52
Tabla 5. Comparación parámetros en sistemas de flotación con sedimentación ..	65
Tabla 6. Solubilidad de varios gases en agua a 24 °C y 1 atm.....	66
Tabla 7. Volumen y peso del aire disuelto en el agua por 1.000 galones a 30 psi	68
Tabla 8. Volumen y peso del aire disuelto en el agua por 1.000 galones a 65 psi	68
Tabla 9. Comparación entre varios sistemas de flotación -Ramírez .....	72
Tabla 10. Comparación entre varios sistemas de flotación – Degremont.....	72
Tabla 11. Sistemas de presurización DAF .....	85
Tabla 12. Clasificación de factores en los grupos de criterios .....	97
Tabla 13. Relación de importancia entre áreas de clasificación .....	98
Tabla 14. Relación de importancia entre factores de diseño .....	99
Tabla 15. Relación de importancia entre factores de logística.....	99
Tabla 16. Valores del criterio de evaluación apreciativa .....	100
Tabla 17. Pesos Ponderados.....	100
Tabla 18. Ficha de información alternativa 1 .....	103
Tabla 19. Características técnicas alternativa 1.....	103
Tabla 20. Ficha de información alternativa 2 .....	104
Tabla 21. Características técnicas alternativa 2.....	105
Tabla 22. Ficha de información alternativa 3 .....	105
Tabla 23. Características técnicas alternativa 3.....	106

Tabla 24. Ficha de información alternativa 4 .....	107
Tabla 25. Características técnicas alternativa 4.....	107
Tabla 26. Ficha de información alternativa 5 .....	108
Tabla 27. Características técnicas alternativa 5.....	109
Tabla 28. Ficha de información alternativa 6 .....	109
Tabla 29. Características técnicas alternativa 6.....	109
Tabla 30. Ficha de información alternativa 7 .....	110
Tabla 31. Características técnicas alternativa 7.....	111
Tabla 32. Ficha de información alternativa 8 .....	111
Tabla 33. Características técnicas alternativa 8.....	112
Tabla 34. Relación de pesos ponderados y valores apreciativos de evaluación.	113
Tabla 35. Relación de costos de inversión inicial.....	118
Tabla 36. Costos fijos operación anual .....	119
Tabla 37. Costos variables operación anual para 34.560 BPD.....	119
Tabla 38. Costos operacionales anuales .....	119
Tabla 39. Relación de costos a largo plazo .....	121

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Ciclo del Agua de Producción.....	24
Figura 2. Relación Agua Petróleo por Región.....	25
Figura 3. Esquema Tanques Desnatadores .....	35
Figura 4. Esquema separador interceptor de placas paralelas.....	36
Figura 5. Esquema separador tipo Hidrociclón .....	39
Figura 6. Filtro a presión tipo caucho.....	45
Figura 7. Relación tamaños de burbujas .....	54
Figura 8. Características de las burbujas según su tamaño .....	55
Figura 9. Mecanismos de formación y adhesión de las burbujas de aire en la flotación por aire disuelto .....	63
Figura 10. Velocidad de elevación de burbujas de aire en agua del grifo.....	64
Figura 11. Velocidad de elevación de burbujas de diámetros mayores .....	66
Figura 12. Solubilidad de diferentes gases en agua como función de la presión ..	67
Figura 13. Distribución del tamaño de las burbujas de aire liberadas en una cámara de flotación en pruebas de flotación de laboratorio.....	70
Figura 14. Distribución de tamaño de burbuja en diferentes sistemas de flotación	71
Figura 15. Relación típica de A/S y sólidos suspendidos.....	74
Figura 16. Diagrama de flotación de espuma .....	75
Figura 17. Diagrama esquemático de una celda de Electroflotación .....	76
Figura 18. Mecanismo de una celda IAF .....	78
Figura 19. Celda de una Unidad de Flotación tipo Gas Disperso con Eductor Hidráulico.....	79

Figura 20. Sección Transversal de una Celda de una Unidad de Flotación Tipo Gas Disperso con Rotor Mecánico .....	80
Figura 21. Esquema Micro-Float.....	81
Figura 22. Diagrama esquemático del sistema DAF .....	82
Figura 23. Diferentes procesos de presurización DAF.....	84
Figura 24. Proceso de flotación de partículas adsorbentes-FPA .....	88
Figura 25. Proceso de Flotación de Agregados Coloidales (FAC).....	89
Figura 26. Cilindro aireado o cámara de burbujas, BS, o “bubble chamber” .....	89
Figura 27. Celda de Flotación Centrífuga del LTM .....	90
Figura 28. Celda de Flotación Jet Convencional, CFJC, y (b) Modificada, CFJM..	91
Figura 29. Columna de flotación – LTM-UFRGS .....	92
Figura 30. Sistema FF-Floculación-flotación.....	93
Figura 31. Esquema metodología de evaluación y comparación de tecnologías ..	95
Figura 32. Esquema identificación de criterios.....	96
Figura 33. Esquema alternativa 1 - Revolift HS Flotation .....	103
Figura 34. Esquema alternativa 2 - Revolift VS Flotation.....	104
Figura 35. Esquema alternativa 3 - Flotación GFT .....	106
Figura 36. Esquema alternativa 4 - Flotación GFT .....	107
Figura 37. Esquema Alternativa 5.....	108
Figura 38. Esquema Alternativa 7.....	110
Figura 39. Comparación costos inversión inicial.....	120
Figura 40. Costos a largo plazo .....	121

## RESUMEN

**TITULO:** EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS BASADAS EN SISTEMAS DE MICRO-BURBUJAS PARA SEPARACIÓN DE RESIDUOS ACEITOSOS EN AGUAS DE PRODUCCIÓN \*.

**AUTOR:** HASTAMORIR CHAPARRO Greysi Yarenis  
MURANDE SÁNCHEZ María Lorena \*\*.

**PALABRAS CLAVE:** Microburbujas, tratamiento de agua, flotación, FAD, FAI.

### DESCRIPCIÓN:

En la actualidad existen diferentes tipos de tratamiento de aguas residuales que garantizan eficiencia de limpieza hasta cierto punto, pero no alcanzan los niveles requeridos en la normativa nacional, llevando a las empresas petroleras a invertir en sistemas costosos y en grandes cantidades de químicos. El uso de tecnologías no convencionales como los sistemas con microburbujas, promete ser una alternativa para solventar los aspectos negativos mencionados anteriormente, ya que minimizan el uso de químicos disminuyendo costos de operación, lo cual se ve reflejado en el ahorro económico. El sistema ofrece una clarificación del agua superior a otros procesos, superando técnica y económicamente a diferentes tecnologías convencionales ya existentes, y lleva al agua a parámetros estandarizados que cumplen con la normativa ambiental vigente Colombiana, la cual busca evitar al máximo la afectación los recursos naturales, la población, la industria y la economía.

En el presente documento se busca evaluar diferentes tipos de tecnologías basadas en el sistema de microburbujas por medio de una metodología ideada como una herramienta para recomendar una acción o elección dentro de las opciones tecnológicas disponibles, identificando cuáles son las variables más significativas y relevantes en este tipo de sistema. Así mismo, para determinar los beneficios económicos de la implementación de un proyecto de flotación, se compara por medio de una análisis de costos con un sistema convencional de sedimentación.

---

\* Proyecto de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías físico-químicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Director del proyecto Ing. Julio Cesar Pérez Angulo.

## ABSTRACT

**TITLE:** EVALUATION OF TECHNOLOGIES BASE ON MICRO-BUBBLE SYSTEM TO SEPARATE OIL WASTE IN PRODUCTION WATER<sup>\*</sup>.

**AUTHOR:** HASTAMORIR CHAPARRO Greysi Yarenis  
MURANDE SÁNCHEZ María Lorena <sup>\*\*</sup>

**KEYWORDS:** Micro-bubbles, Water treatment, Flotation, DAF, IAF.

### CONTENT:

In this time there are different kind of effluent treatment that guarantee a more efficient treatment to clean, but sometimes this is not enough to achieve some levels permitted by national standards, because of that, many oil companies have to invest in expensive systems and a great chemicals quantity. The use of non-convectional technologies like micro-bubble systems can be an alternative to solve the negative aspects mentioned before, micro-bubble system uses small chemical amount decreasing operational costs and saving up money. The system provides better cleaning water than other processes. Also this system can provide clean water under national standards and minimize the environmental impact, social impact, industrial impact and economy impact.

In this document have looked to evaluate different kind of technologies base on micro-bubble system like a fundamental alternative to clean the water by a methodology that can be a tool to recommend a process inside of many available options that have been important but the results are very different at the moment to compare with micro-bubble system . The purpose of this is to identify more significant variables in this system, in order to determine economic benefits of the implementation micro-bubble project and compare it with other system using a cost analysis system.

---

<sup>\*</sup> Thesis of Grade

<sup>\*\*</sup> Faculty of Physical-Chemical Engineering. Petroleum Engineering School. Project Director Eng. Julio Cesar Pérez Angulo.

## INTRODUCCION

En la industria petrolera el agua es el producto residual más abundante, el cual, además de producirse junto con el crudo y gas, es captado para utilizarlo en diferentes actividades en las áreas de perforación y producción. Este recurso requiere de procesos costosos de eliminación y remoción de contaminantes (aceites, grasas, bacterias y sólidos).

En la actualidad existen diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales que garantizan eficiencia de limpieza hasta cierto punto, pero no alcanzan los niveles requeridos en la normativa nacional, llevando a las empresas petroleras a invertir en diferentes tipos de sistemas costosos y en grandes cantidades de químicos. Aunque los químicos ayudan en gran medida al procedimiento, acarrear problemas a largo plazo; hay que tener en cuenta que al utilizar productos de este tipo, estos siempre tienden a reaccionar con el agua y al mismo tiempo afectan a equipos posteriores en el tren de tratamiento. Estos además, requieren de períodos y áreas relativamente amplios para garantizar una mayor efectividad.

El uso de tecnologías no convencionales como los sistemas con microburbujas, promete ser una alternativa para solventar los aspectos negativos mencionados anteriormente, ya que minimizan el uso de químicos para evitar daños ambientales y al mismo tiempo, disminuyen costos de operación, lo cual se ve reflejado en el ahorro económico. El sistema no produce emanaciones al medio ambiente y nos ofrece una clarificación del agua superior a otros procesos, superando técnica y económicamente a diferentes tecnologías convencionales ya existentes, y llevando el agua a parámetros estandarizados que cumplen con la normativa ambiental vigente Colombiana, la cual busca evitar al máximo la afectación los recursos naturales, la población, la industria, economía, etc.

La flotación es uno de los procesos principales para la generación de microburbujas, e involucra la inyección de finas burbujas de gas en una fase líquida.

En el presente documento se busca evaluar diferentes tipos de tecnologías basadas en el sistema de microburbujas, identificando cuáles son las variables más significativas y relevantes en este tipo de sistema.

En el primer capítulo se presenta un breve estado del arte de las tecnologías existentes en el mercado para separar residuos aceitosos de aguas de producción. Además, se contextualiza al lector en la normativa legal vigente colombiana en la disposición de aguas residuales.

En el segundo capítulo se establece la línea base de la investigación, en donde se recopila información sobre los principios básicos de los sistemas de microburbujas, tales como el tamaño de la burbuja generada, su incidencia en la eficiencia del tratamiento, velocidad de elevación, solubilidad del gas utilizado, entre otros.

Para el tercer capítulo se plantea la metodología de evaluación, la cual permite desarrollar un proceso de forma sistemática, teniendo en cuenta aspectos tales como las propiedades y factores de rendimiento del sistema de micro-burbujas. Esto, con el fin de darle valor a las propiedades de cada uno de los equipos seleccionados y poder realizar la comparación cuantitativa de los resultados arrojados.

A partir de la metodología diseñada, en el cuarto capítulo, se procede a evaluar las propiedades de los diferentes equipos consultados, dando como resultado una clasificación, y finalmente, la identificación del mejor equipo y de las propiedades más relevantes.

En el quinto capítulo, se realiza un análisis de costos, comparando un sistema de flotación de microburbujas con un sistema de sedimentación común, el cual nos arroja la posible viabilidad económica de inversión en un proyecto de este tipo.

## 1 ASPECTOS GENERALES AGUA DE PRODUCCIÓN

El agua siempre está asociada a la producción de hidrocarburos, esta proviene ya sea de un acuífero bajo la capa de hidrocarburo, agua connata que se encuentra en el yacimiento, agua condensada del vapor durante los cambios de presión en la producción, agua proveniente de formaciones diferentes al yacimiento, agua de recobro mejorado, y finalmente una combinación de las anteriores.

El agua de producción normalmente es salada, con compuestos inorgánicos disueltos, escamas suspendidas, gases disueltos, hidrocarburos dispersos, bacterias y variedad de sustancias tóxicas y radiactivas naturales. Esta puede tener concentraciones de sodio entre 150.000 y 180.000 ppm caso contrario al agua del mar que tiene una concentración de 35.000 ppm de sodio.<sup>1</sup>

La producción de este fluido ha llegado a ser de preocupación para la industria petrolera, debido a que esta se tiene que tratar cuidadosamente y el costo de este proceso es elevado. De acuerdo a las leyes ambientales de cada país, el agua puede ser reinyectada o descargada en el medio ambiente siempre y cuando cumpla con las especificaciones y parámetros químicos.

### 1.1 GENERALIDADES

El agua relacionada en los procesos de la Industria petrolera es empleada en cantidades enormes en los campos de hidrocarburos, ocasionando problemas ambientales causados por su contaminación, calidad y abundancia.

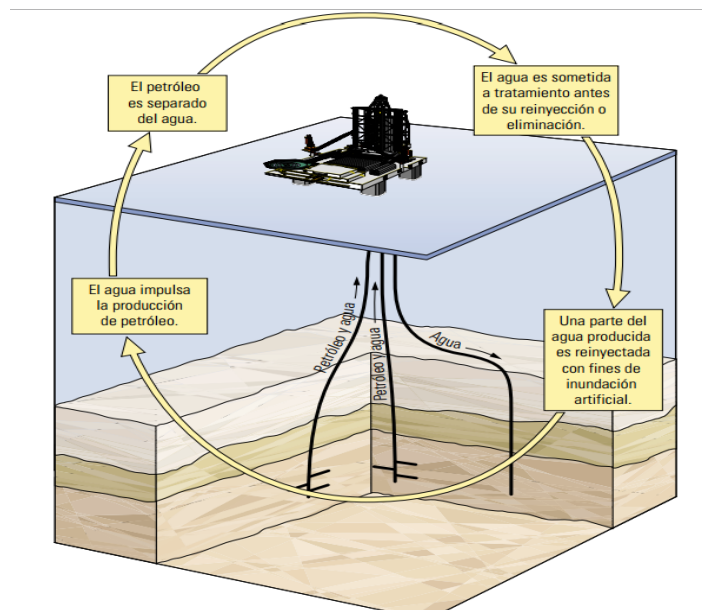
---

<sup>1</sup> BASTIDA, José Luis, *Agua de Formación for Introducción a la Ingeniería de Petróleo*, Scribd 2008, página 5 y 8, disponible en internet en: <http://es.scribd.com/doc/50593770/5/Agua-de-Formacion>. citado el 15 de agosto de 2013

### 1.1.1 Ciclo del Agua Asociada a la Producción de Petróleo.

Las arenas petrolíferas son barridas por el agua proveniente de un acuífero subyacente o de los pozos inyectoros, mezclándose y produciéndose junto con el petróleo. Este flujo de agua a través de un yacimiento, invade la tubería de producción y las instalaciones de procesamiento, convirtiéndose en un problema cuando el volumen de petróleo producido que se lleva a la superficie disminuye y los sistemas de tratamiento de agua en superficie se sobrecargan; luego, es tratada, eliminada y/o inyectada para mantener la presión del yacimiento (Ver **Figura 1**).

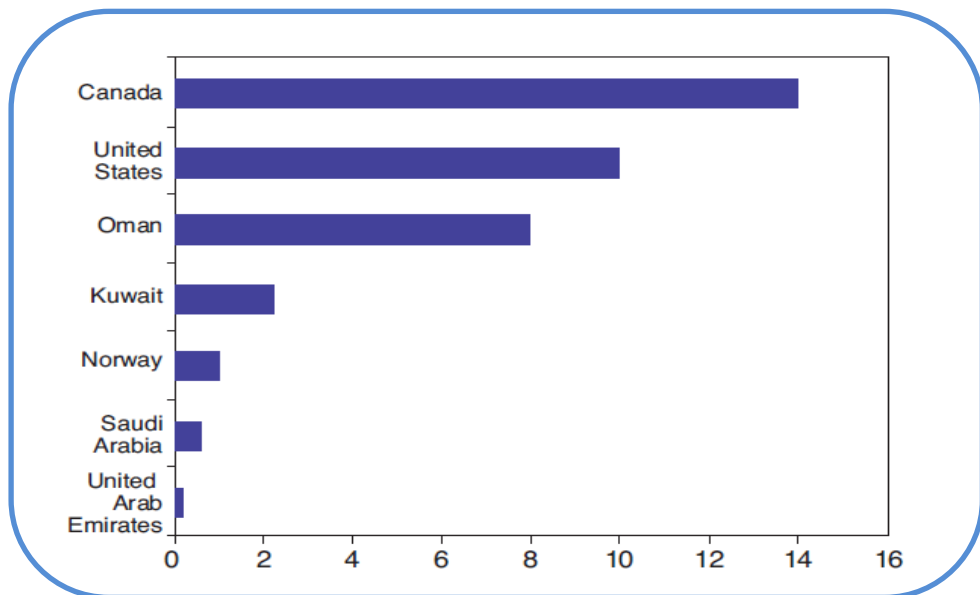
Figura 1. Ciclo del Agua de Producción



Fuente: Oil Field Review "control del agua", Schlumberger, verano del 2000

A nivel mundial, en promedio por cada barril de petróleo se producen como mínimo 3-5 barriles de agua y en ciertas regiones maduras, esta cifra puede ser tan alta como de 10 a 14 barriles de agua por barril de petróleo como se muestra en la **Figura 2**.

Figura 2. Relación Agua Petróleo por Región



Fuente: Lahcen, Nabzar y Duplan, Jean-Luc. Water in Fuel Production and Refining. Panorama Review

De acuerdo con un estudio realizado por IFP (Instituto Francés del Petróleo), un estimado de 250 millones de barriles por día (MMBPD) fueron producidos en 2008. Esta cifra va a ser superior a 300 (MMBPD) en el 2020, es decir, un aumento de 20%, incremento estimado principalmente a las actividades de mar adentro. Estos campos son actualmente menos maduros, y la producción de agua asociado con ellos se incrementará en más del 50 %.<sup>2</sup>

La inversión en investigación de tecnologías, equipos, mano de obra, espacios, presupuesto y tiempo, sin duda son factores de gran importancia para la industria, la cual va en continua búsqueda de nuevas ideas y estrategias para brindar mayor beneficio y una mejor calidad de vida la comunidad y el medio ambiente.

---

<sup>2</sup> Nabzar, Lahcen, y Jean-Luc, Duplan. *Water in Fuel Production and Refining*. Panorama Review, 2011. Pág. 3. 10 h.

Ésta es una de las áreas de mayor importancia, ya que se trata de mitigar el impacto que el agua puede ocasionar sin su debida atención, con lo que se busca reutilizarla en proyectos de inyección de agua para mantener la presión del yacimiento, en recobro secundario, en cultivos, suelos, entre otros.

## 1.2 PROBLEMAS Y CONTAMINANTES MÁS COMUNES DEL AGUA DE PRODUCCIÓN

El agua producida contiene cantidades variables de sales y gases disueltos (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S). Puede haber algunos sólidos en suspensión que contengan trazas de metales pesados, y posiblemente, niveles excesivos de radiación de estroncio y radio. Generalmente, antes del tratamiento, el agua producida contiene niveles demasiados altos de gotas de petróleos suspendidas y emulsificadas. Casi siempre las salmueras de los yacimiento petrolíferos no son aptas para el consumo humano, ni para los animales. También puede aparecer relativamente clara y a menudo es difícil distinguirla de otras aguas<sup>3</sup>.

A continuación, se muestran los contaminantes más comunes que se presentan en el agua de producción:

### 1.2.1 Contenido de aceite.

El aceite se le concede especial atención por su escasa solubilidad en el agua, no son biodegradables, forman películas impermeables que impiden el paso del oxígeno y matan la vida tanto en el agua como en tierra, esparcen productos

---

<sup>3</sup> (S.A, 1999)S.A, D. (1999). *Risgos Medio Ambiente Depuroil S.A.* Recuperado el 17 de Agosto de 2013, de <http://www.euskalnet.net/depuroilsa/Riesgosmedioambiente.html>

tóxicos que pueden ser ingeridos por los seres humanos de forma directa o indirecta<sup>4</sup>.

Es necesario realizar pruebas de análisis para determinar el contenido de aceite en cualquier agua del sistema, sin importar su origen, ya que existen diversas formas por las cuales el agua puede contaminarse con aceite. Los análisis de composición química del agua permiten identificar los valores de concentración de hidrocarburos, esto con el fin de establecer el nivel de perjuicio que puede traer su presencia en el fluido.

Para evitar que el crudo sea arrastrado con el agua, se debe asegurar que el proceso de separación agua – crudo funcione apropiadamente y que el desmulsificante actúe de forma adecuada, ya que este puede ocasionar la disminución en la inyectividad y en otros casos la disminución de la densidad efectiva de las partículas reduciendo la efectividad del proceso de sedimentación.<sup>5</sup>

#### 1.2.2 Gases ácidos (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S disuelto) con una tendencia corrosiva.

Los gases ácidos usualmente resultan de la producción de aceite, aunque el CO<sub>2</sub> puede ser absorbido por el agua desde el aire a unas condiciones específicas. El ácido sulfhídrico, también conocido como sulfuro de hidrógeno, tiene la característica de tener un desagradable olor y ser muy tóxico. Por su parte el dióxido de carbono es un gas incoloro e inodoro, que a concentraciones bajas no es tóxico, pero en concentraciones elevadas incrementa la frecuencia respiratoria y puede llegar a producir sofocación. El dióxido de carbono es soluble en agua y la

---

<sup>4</sup> MAZARREDO Alameida, *Control reciclaje y mantenimiento de aceites industriales*, Depuroil S.A., *Riesgos medio ambientales de los aceites industriales*, 1999, disponible en internet en: <http://www.euskalnet.net/depuroilsa/Riesgosmedioambiente.html>, citado el 2 de septiembre de 2013

<sup>5</sup> BLANCO SIMBAQUEBA, Johanna. y DELGADILLO AYA, Claudia L. *Metodología integrada para el diseño de un monitoreo de inyección de agua desarrollado en un campo petrolero*. TESIS (Ingenieras de petróleos). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingeniería fisicoquímicas, 2006. Pág. 78. 261 h.

solución resultante puede ser ácida como resultado de la formación de ácido carbonilo.

### 1.2.3 Formación de incrustaciones.

Cada vez que se reinyecta agua o se produce agua en un pozo de gas o petróleo existe la posibilidad de formación de incrustaciones. Viene dado por la cristalización de sólidos solubles presentes en el agua por un cambio de solubilidad drástico, generado por incompatibilidad de agua, caídas altas de presión o temperatura, variaciones en la velocidad de flujo (laminar o turbulento), tipo de superficie y los tipos y cantidades de impurezas contenidas en el agua.

Según el fluido que les da origen, las incrustaciones pueden clasificarse en:

- Incrustaciones inorgánicas (provenientes del agua).
- Incrustaciones orgánicas (provenientes de los hidrocarburos).

En este caso, son de interés las incrustaciones inorgánicas.

Las incrustaciones inorgánicas son precipitados químicos capaces de “viajar” en suspensión en el agua (y en menor medida en los hidrocarburos) y adherirse a las superficies (metálicas o rocosas). La formación de los precipitados y su depositación o adherencia son fenómenos relacionados y sucesivos pero no necesariamente simultáneos.<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> Barba Díaz, Diana y Martínez Villareal, Paola. Tesis *Estudio y diseño de un sistema cerrado de reinyección de agua de formación para la estación central del campo Sacha*. Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos. Quito, Octubre 2009. Pág. 30. 172h.

#### 1.2.4 Formación de sólidos .

El agua que circula por todo el sistema de facilidades de superficie y en especial la proveniente de los pozos productores, contienen dos tipos de sólidos, en suspensión y disueltos; su presencia en el agua puede causar problemas como:

- Taponamiento de líneas, válvulas u otras facilidades de superficie.
- Erosión en válvulas, bombas y líneas.
- Taponamiento de la pared del pozo y de la formación
- Precipitación de escamas

##### 1.2.4.1 Sólidos disueltos

Son partículas de 1 a  $1 \times 10^{-3}$  micras de diámetro, que se mantienen en suspensión aun en condiciones de reposo por un tiempo determinado. Se pueden remover a través de la aplicación de sustancias coagulantes y floculantes que neutralizan las cargas o potenciales incipientes, la floculación permite que sean removidos por la acción de la gravedad.

##### 1.2.4.2 Sólidos en suspensión

Son sólidos de tamaño relativamente grande, mayores a una micra de diámetro, cuyo peso específico permite que se mantengan suspendidos en el agua. El material particulado más pesado que el agua, tiende a sedimentar en el fondo como resultado de la fuerza de gravedad en el proceso de sedimentación. Al contrario, las partículas suspendidas más ligeras que el agua tienden a flotar por

un proceso llamado flotación<sup>7</sup>. Es uno de los parámetros utilizados para evaluar la agresividad de las aguas de formación y para determinar la eficiencia de las unidades de tratamiento, ya que el objetivo de las mismas es la retención de este material por medio de los procesos físico-químicos y de floculación biológica y química. El conocimiento de su presencia es importante para determinar la necesidad de filtración, la selección de filtros y monitorear el rendimiento de los mismos.<sup>8</sup>

#### 1.2.5 Corrosión.

Es la pérdida progresiva o deterioro de los materiales metálicos que están en contacto con el medio ambiente debido a la presencia de reacciones químicas y electrolíticas. Es un proceso natural, en el cual se produce una transformación del elemento metálico a un compuesto más estable que es un óxido.<sup>9</sup>

La corrosión debe ser controlada para extender el tiempoG de vida útil de las instalaciones, minimizar la generación de sólidos suspendidos, y prevenir la pérdida de agua o derrame al medio ambiente.

#### 1.2.6 Bacterias.

El agua fresca y las salmueras pueden contener bacterias que generan problemas, existen cuatro tipos de bacterias encontradas en los campos petroleros:

---

<sup>7</sup> SALAZAR MARTINEZ Adriana Ysabel, *Evaluación del Sistema de Tratamiento de la Planta de Inyección de Agua salada Del campo Santa Rosa*, disponible en internet en: <http://ri.biblioteca.udo.edu.ve/bitstream/123456789/2791/1/102-TESIS.IQ.pdf>. PDVSA, 2010. Pág. 35.131h.

<sup>8</sup> Barba Díaz, Diana y Martínez Villareal, Paola. Tesis *Estudio y diseño de un sistema cerrado de reinyección de agua de formación para la estación central del campo Sacha*. Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos. Quito, Octubre 2009. Pág. 25-26. 172h.

<sup>9</sup> Ídem.

- Sulfato – Reductoras.
- Del Hierro.
- Lodos Formadores de Bacterias.
- Clostridium

Las bacterias pueden contribuir a la corrosión y taponamiento de líneas. El taponamiento resulta de la actividad bacteriana debido a la formación de biomasa, la generación de productos de corrosión, tales como el sulfuro de hierro o la precipitación del hierro soluble en el agua.

#### 1.2.7 Formación de escamas.

Cuando se forman componentes insolubles en el agua a partir de reacciones de constituyentes asociados a ella, pueden depositarse en tuberías u otros equipos por donde esta fluye. Dependiendo de los componentes presentes en el agua, las sustancias que pueden formar escamas en operaciones relacionadas con el agua son: carbonato de calcio, carbonato de magnesio, sulfato de calcio, sulfato de bario, sulfato de estroncio y compuestos de hierro, tales como óxido férrico y sulfuro ferroso.

### 1.3 TRATAMIENTOS

El agua producida siempre tendrá algún tipo de tratamiento de primaria antes de su disposición final. Este sistema podría tomar la forma de un tanque desnatador, una vasija desnatadora, CPI, separador de flujo cruzado o una unidad de flotación de gas; aparte de la unidad de flotación de gas, todos estos dispositivos emplean técnicas de separación por gravedad. Dependiendo de la gravedad del problema a tratar, puede ser necesario un tratamiento secundario.

El tratamiento secundario podría utilizar una unidad CPI, un separador de flujo transversal, o una unidad de flotación de gas. Hidrociclones líquido-líquido o centrifugadoras se utilizan a menudo ya sea en una sola etapa o con un recipiente desnatador aguas arriba o aguas debajo de la unidad de flotación.

En la **Tabla 1** se enumera los distintos métodos empleados en los sistemas de tratamiento de agua producida y los tipos de equipos que emplean cada método.

Tabla 1. Equipos para tratamiento de aguas de producción

Proceso	Equipos	Remoción (mm)
Separación gravitacional	Skim tanks Skim vessels Separadores API	100-150
Coalescencia	CPI PPI	30-50
Flotación	Celdas de flotación Microburbujas	10-20
Gravitacional aumentada	Hidrociclones Centrífugas	15-30
Filtración	Varios	<10

**Fuente:** Modificada Arnold, Ken y Stewart, Maurice. *Surface Production Operations. Design of Oil -Handling Systems and Facilities. Primera Edición. 1999.*

Estos tratamientos los empleamos para poder mitigar los problemas que ya hemos mencionado anteriormente, según su cantidad y en las condiciones en la que se presente el agua de producción su análisis y así emplear el más adecuado posible.

Los equipos de tratamiento de agua se basan en los siguientes procesos para su operación:

- Diferencia de gravedades específicas (Ley de Stokes)
- Flotación
- Gravedad mejorada
- Selectividad física (Filtración)
- Tratamiento químico

Para cumplir los requerimientos de descarga se necesitan tanques desnatadores, interceptores de placas paralelas, celdas de flotación por gas, coalescedores e hidrociclones, en los cuales se profundiza a continuación.<sup>10</sup>

### 1.3.2 Remoción del petróleo disperso

La cantidad de petróleo en el agua de producción puede ocasionar problemas pozo abajo en el sistema de reinyección especialmente en pozo cuya zona de reinyección no contenía petróleo y por tanto no tenía saturación de aceite residual. El nivel aceptado de aceite y grasa en el agua a ser descargada en el mar están en un promedio de 40mg/l con una concentración máxima en una muestra de 72 mg/l. El aceite también ensuciará rápidamente los filtros. Por consiguiente es importante trata de disminuir el aceite en el agua. Si la concentración de aceite en el agua que sale de los separadores de agua libre es demasiado alta, se debe de considerar el uso de un tratador adicional u otra manera de hacerlo. Si el agua del tratador contiene altas concentraciones de aceite y un control muestra que el tratador está operando óptimamente, entonces se necesitara tratamiento adicional.

Entre los equipos más utilizados para la remoción de petróleo disperso se tiene:

- Tanques desnatadores
- Separadores de placas paralelas
- Celdas de flotación con gas
- Coalescedores
- Hidrociclones

---

<sup>10</sup> RACITE Miguel Ángel, Ecología agua de pozos. Scribd 29 de Abril de 2011, disponible en internet en <http://es.scribd.com/doc/54173212/50/Remocion-del-Petroleo-Disperso>. Pág. 30. 44 h.

### 1.3.2.2 Tanques desnatadores

En este tipo de tanque ocurre la dispersión y coalescencia (propiedad o capacidad de ciertas sustancias y cosas para unirse o fundirse con otras en una sola). La dispersión es la separación de las gotas de agua, y la coalescencia es el aglutinamiento de las mismas. Sin embargo, después de este proceso aún quedan diminutas cantidades de aceite en el agua.<sup>11</sup>

Son tanques grandes cilíndricos, con distribuidores y paredes internas para incrementar el tiempo de residencia para que el aceite vaya a la superficie donde se recoge y así lograr la separación del crudo del agua.

Pueden ser verticales (Ver **Figura 3.a**) en el que el flujo entra y pasa a un tubo que lo dirige hacia abajo a través de la capa de aceite permitiendo que se liberen pequeñas cantidades de gas, de ahí va a un sistema propagador y el agua sigue fluyendo hacia abajo, en contra corriente las gotitas de aceite que coalescen hasta los colectores de superficie que se encargan de recogerlos: el espesor de la capa de aceite depende de la altura relativa del vertedero de aceite y de la pierna de agua y sobre todo de la diferencia en gravedad específica de los dos líquidos.

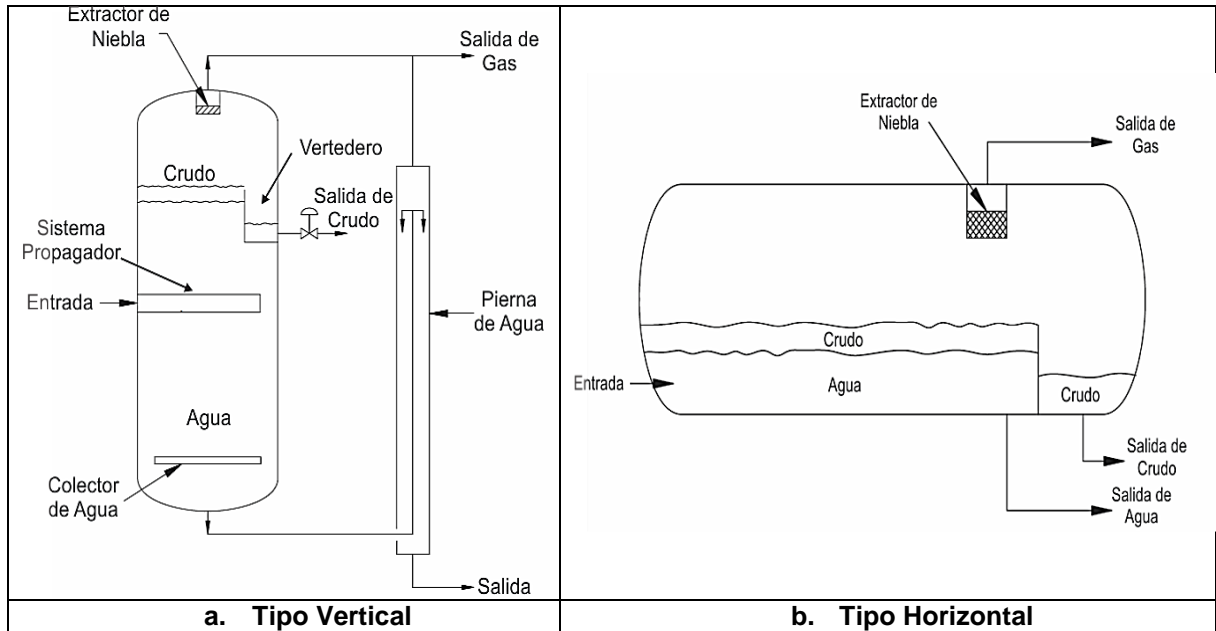
En los horizontales (Ver **Figura 3.b**), el flujo entra a través de un tubo de descenso (downcomer) para separar el gas, las gotitas de aceite suben perpendicularmente al flujo de agua que es horizontal a lo largo del recipiente, se instalan baffles para que las gotas de aceite coalescan y asciendan a la superficie donde son desnatados sobre el vertedero de aceite. Estos son un poco más eficientes que los verticales.<sup>12</sup>

---

<sup>11</sup> MENDEZ FERNANDEZ, Jesús Gilberto. Tesis *Optimización proceso de endulzamiento del gas natural*. Scribd 28 de junio de 2012. Pág. 24, disponible en internet en: <http://es.scribd.com/doc/79689396/Optimizacion-Del-Proceso-de-Endulzamiento-Del-Gas-Natural#page=8>, citado el 15 de agosto de 2013

<sup>12</sup> CASTRO CASTELL, Martha Rocío. Estado del arte del sistema de tratamiento de aguas de producción en campos petroleros. TESIS (Ingenieras de petróleos). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingeniería fisicoquímica, 2004. Pág.- 30.110 h.

Figura 3. Esquema Tanques Desnatadores

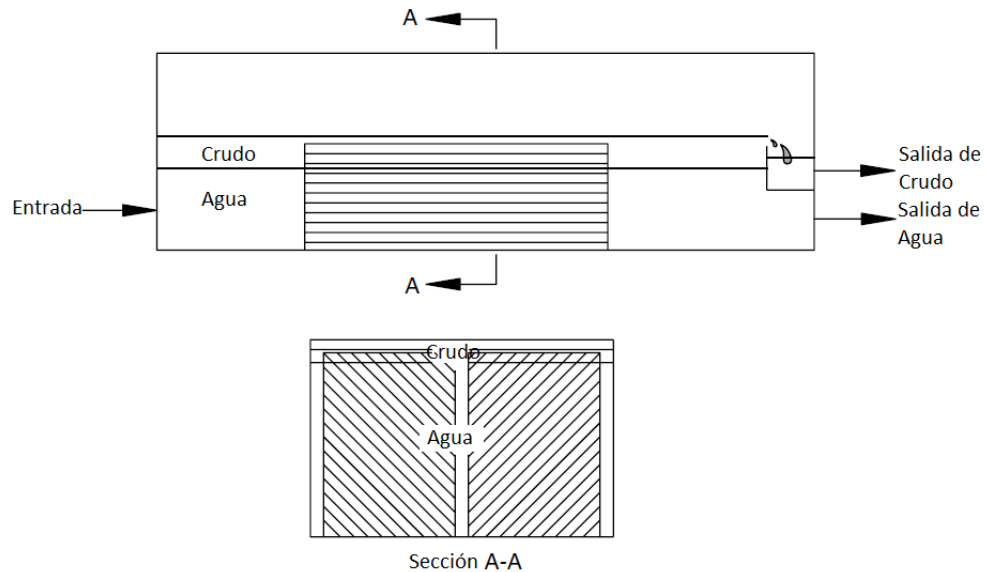


**Fuente:** Modificada Arnold, Ken y Stewart, Maurice. *Surface Production Operations. Design of Oil -Handling Systems and Facilities. Primera Edición. 1999.*

### 1.3.2.3 Separador de placas paralelas

El separador de placas paralelas es un separador por gravedad que consiste en una pila de placas paralelas separadas por un espacio de 4 a 1 cm. El agua aceitosa pasa entre las placas y las partículas de aceite saben a la superficie de placa superior donde coalescen. El aceite aglutinado se traslada por la placa hasta llegar a la superficie de agua donde se desnata. Básicamente, las placas paralelas reducen la distancia que debe viajar el aceite para llegar a una superficie donde se puede coalescer. El espaciamiento entre las placas es muy importante en el diseño.

Figura 4. Esquema separador interceptor de placas paralelas



**Fuente:** Modificada Arnold, Ken y Stewart, Maurice. *Surface Production Operations. Design of Oil -Handling Systems and Facilities. Primera Edición. 1999.*

Existen dos tipos básicos de coalescedor de placa paralela; el interceptor de placa paralela (Ver **Figura 4**) y el separador de placa inclinada. El separador de placa inclinada utiliza una pila de placa inclinada a 45 grados. Los separadores de placa inclinada son utilizados frecuentemente costa afuera donde los niveles de espaciamiento y peso son muy restrictivos.

#### 1.3.2.4 Celdas de flotación

Su función como tal es una disminución aparente de la gravedad específica del aceite causado por la conexión entre las gotas de aceite y las burbujas de gas posibilitando una gran velocidad de ascenso y separación más rápida. Se necesita de químicos como los polielectrolitos que benefician el aumento de temperatura, salinidad y eficiencia ya que su eficiencia puede disminuir si esta entre (3-4)% de NaCl y superior a los 200°F. Según de donde venga el gas se puede clasificar en

celdas de flotación por gas/aire disuelto y celas de flotación gas/aire inducido o disperso.

Los diseños de gas/aire disuelto toman una porción del agua tratada y la saturan con gas natural o aire en una contactora. A mayor presión más cantidad de gas puede ser disuelto en el agua. La mayoría de las unidades están diseñadas para una presión de contacto de 20 a 40 psig. Normalmente de 20% al 50% del agua tratada es recirculada para que se contacte con el gas o aire. El agua saturada, es luego inyectada en el tanque de flotación, allí el gas disuelto o el aire rompe la solución y se libera en forma de burbujas de pequeño diámetro que contactan las gotas de aceite en el agua y las llevan a la superficie en una espuma.

En los diseños de gas/aire disperso o inducido, las burbujas son dispersadas en la corriente total por un aparato inductor o por un vórtice creado por un motor mecánico. En las celdas de flotación con reductor hidráulico, el agua limpia es bombeada a un cabezal de re-circulación que alimenta una serie de educutores Venturi, el agua que fluye por estos educutores, succiona gas del espacio de vapor de pequeña burbujas: estas burbujas suben y arrastran consigo a las pequeñas gotas de aceite formando una espuma en superficie que posteriormente es desnatada. Estas unidades pueden tener de 1-4 cámaras y usan menos potencia y menos gas/aire que las unidades de rotor mecánico.<sup>13</sup>

#### 1.3.2.5 Coalescedores

Los coalescedores son recipientes con una gran superficie. A medida que el agua aceitosa fluye, las gotitas de aceite finamente dispersas coalescen hasta tener el tamaño suficiente como para flotar hacia la superficie y ser recogidas. El poliuretano es usado en forma de un paquete mojado en aceite. El aceite y los

---

<sup>13</sup> CASTRO CASTELL, Martha Rocío. Estado del arte del sistema de tratamiento de aguas de producción en campos petroleros. TESIS (Ingenieras de petróleos). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingeniería fisicoquímica, 2004. Pág.33-34.110 h.

sólidos mojados en aceite se juntan sobre el paquete de poliuretano y se retiran automáticamente. A medida que se junta el aceite la caída de presión a través de la unidad aumenta y se requiere la regeneración, esta se hace comprimiendo y expandiendo alternativamente el paquete y colectando los fluidos exprimidos.<sup>14</sup>

#### 1.3.2.6 Hidrociclones

Estos dispositivos usan una fuerza centrífuga para remover las gotas de aceite del agua aceitosa. Su principio de separación se basa en la alta diferencia de densidades entre el aceite y el agua. Estos dispositivos pueden ser estáticos o dinámicos. Básicamente son usados en operaciones costa afuera ya que pueden remover gotas de aceite hasta de 2  $\mu\text{m}$  pero tienen un alto costo. Ahorran espacio y pesan menos que los separadores convencionales.

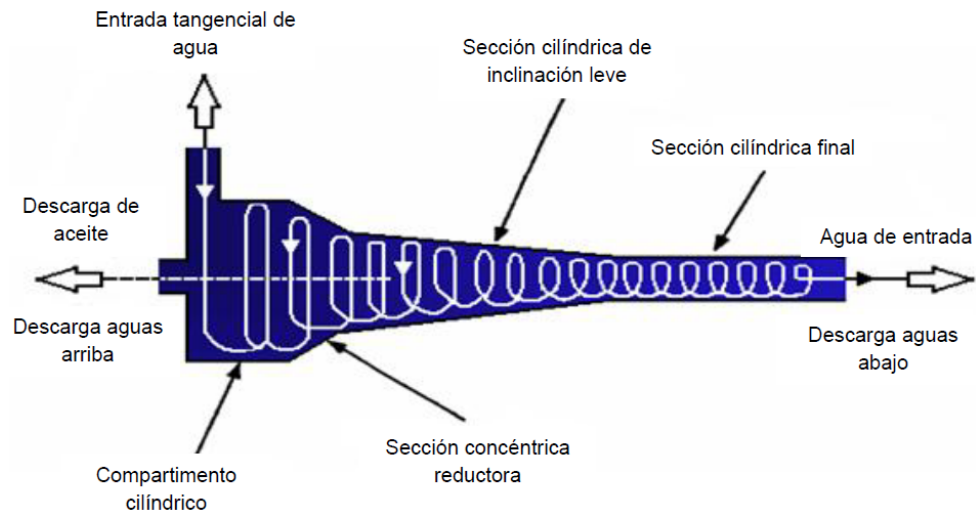
El desempeño de estos dispositivos depende de la relación que exista entre la tasa de fluido en la salida corriente arriba a la tasa total de fluido de entrada, normalmente es óptima entre (1- 3) %. Esta relación es proporcional a la razón de caída de presión, PDR. El desempeño también se ve afectado por el tamaño de la gota de aceite a la entrada, la concentración de aceite a la entrada, el diferencial de gravedades específicas y la temperatura de entrada (a temperaturas mayores de 80°F mejor operación. Para objeto de diseño, la suposición de una eficiencia de 90% es válida.<sup>15</sup>

---

<sup>14</sup> RACITE Miguel Ángel, Ecología agua de pozos. Scribd 29 de Abril de 2011, disponible en internet en <http://es.scribd.com/doc/54173212/50/Remocion-del-Petroleo-Disperso>. Pág. 34. 44 h.

<sup>15</sup> CASTRO CASTELL, Martha Rocío. Estado del arte del sistema de tratamiento de aguas de producción en campos petroleros. TESIS (Ingenieras de petróleos). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingeniería fisicoquímica, 2004. Pág.36.110 h

Figura 5. Esquema separador tipo Hidrociclón



**Fuente:** CASTRO, M. *Estado del Arte de Sistemas de Tratamiento de Aguas de Producción en Campos Petroleros*. 2004.

### 1.3.3 Remoción de gas disuelto

Hay dos tipos de sistemas para las plantas de tratamiento de agua: El sistema cerrado está hecho para evitar el roce del agua con el aire y disminuir de esa manera las pérdidas de gas disuelto y el atrapamiento de aire. El sistema se mantiene a presión y el equipo es más costoso. Se permite que siga cualquier corrosión resultante de gases disueltos, principalmente  $H_2S$  y  $CO_2$ .

En el sistema abierto permiten emplear embalses grandes de retención que dan tiempo al agua para estabilizarse, las partículas suspendidas se depositan y las gotas de aceite coalescen en la superficie sin evitar la presencia de corrosión e incrustaciones. En varias plantas el agua es aireada para retirar los gases no deseables con el  $H_2S$ .

#### 1.3.3.1 Remoción de oxígeno

Una vez que el oxígeno se ha introducido en las salmueras, rara vez se extrae. Cuando se debe inyectar el agua, frecuentemente es más económico retirar el

oxígeno o usar cañería y tubería recubierto de plástico resistente a la corrosión. Cuando debe descargarse el agua, la presencia de oxígeno disuelto es favorable. Sin embargo, en algunos casos, particularmente cuando se usan grandes cantidades de agua dulce de reposición, hay que retirar el oxígeno. Existen varios métodos para extracción de oxígeno:

➤ Separación del Gas:

Generalmente se realiza con gas natural en una torre de deserción en contracorriente que contiene empaque o bandejas. Las bandejas son más comunes debido a que el empaquetamiento tiende a ensuciarse con los sólidos suspendidos. El principio de la separación es el de reducir la concentración de oxígeno hasta la solución, reduciendo su presión parcial y por lo tanto su solubilidad. La cantidad de oxígeno extraída es una función de:

- ◆ La concentración de Oxígeno Disuelto en el agua
- ◆ La cantidad de bandejas teóricas
- ◆ La relación Gas - Agua
- ◆ La Presión
- ◆ La Temperatura

Una torre de separación bien diseñada puede reducir al oxígeno a 0.01 a 0.02 ppm.

➤ La desaireación en vacío

Reduce la presión parcial del oxígeno por encima de la superficie del agua por reducción de la presión encima del agua hasta que el agua hierve. La desaireación en vacío también se lleva a cabo en una torre que contiene empaquetamiento o bandejas, aunque el empaquetamiento es menos complejo. La presión se reduce

en la torre usando una bomba de vacío. Las concentraciones de oxígeno se bajan a alrededor de 0.1 ppm en una torre de una etapa y a alrededor de 0.01ppm en una torre de tres etapas.<sup>16</sup>

### 1.3.3.2 Remoción de gases ácidos

En la producción de aceite normalmente se muestra presencia de gases ácidos como H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub> los cuales son removidos mejor, con algunos métodos mecánicos y en algunas ocasiones se ha empleado la acroleína (líquido incoloro o amarillo de olor desagradable, utilizado principalmente como un químico intermedio en la producción de ácido acrílico y sus ésteres) resultando eficiente. Sin embargo, el manejo de estos gases después de su remoción puede ser complicado y costoso; por tanto, es más opcional incorporar en las facilidades de superficie equipos que disminuyan el efecto de los gases disueltos que su respectiva remoción y más si es por aireación del agua, el cual lleva a inconvenientes después de la remoción de oxígeno y también causa la oxidación y precipitación del hierro y el magnesio. En el caso del pH juega un papel muy importante para su remoción ya que, con un pH menor a 5, casi todo el ácido se presenta como un gas asociado y puede ser eliminado fácilmente. Estos son los métodos de remoción empleados.

- En el caso de la **remoción por aireación** libera H<sub>2</sub>S por la saturación del agua con aire, solucionando el problema pero ocasionando peores.
- Por otro lado, los **gases de combustión** de escapes de la combustión de motores, deben ser revisados para la combustión completa y prevenir la entrada de oxígeno al sistema.

---

<sup>16</sup> CASTRO CASTELL, Martha Rocío. Estado del arte del sistema de tratamiento de aguas de producción en campos petroleros. TESIS (Ingenieras de petróleo). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingeniería fisicoquímica, 2004. Pág.35.110 h

### 1.3.3.3 Remoción de CO<sub>2</sub>

Cuando el CO<sub>2</sub> se disuelve en agua, este forma ácido carbónico, disminuye el pH del agua e incrementa su corrosividad: éste último se conoce actualmente como “corrosión dulce”. A mayor presión parcial, se incrementa la solubilidad. Por tanto, en sistemas bifásicos (agua + gas), la rata de corrosión se incrementa a medida que la presión parcial del CO<sub>2</sub> se incremente.

La ionización de CO<sub>2</sub> también depende del pH y la cantidad que puede ser eliminada es una función del pH. Un pH de 5 produce 95% del gas disponible y un pH de 4 logra 100%. Los métodos de eliminación incluyen:

- **La Aireación** o barrido mecánico con aire.
- **La Desgasificación al Vacío**, donde se reduce la presión parcial, sobre el agua. Se debe cuidar de mantener un pH bajo para impedir que se formen incrustaciones. El pH se corrige después de haber eliminado el CO<sub>2</sub>.

### 1.3.4 Remoción de sólidos en suspensión

Los sólidos suspendidos presentes en el agua ocasionan problemas como: Taponamiento de líneas, válvulas u otras facilidades de superficie, erosión en válvulas, bombas y líneas, taponamiento de la pared del pozo y de la formación y precipitación de escamas. Estos agentes dañinos para los procesos de inyección pueden ser en primera instancia, partículas de arena, arcillas, lodo y materia orgánica, los precipitados formados por reacciones químicas y los productos de corrosión, tales como óxido de hierro o sulfuro de hierro son también posibles agentes taponantes; los agentes biológicos como colonias de bacterias, algas y plancton, también pueden presentar problemas, particularmente en las aguas superficiales.

Para la remoción de estos sólidos empleamos algunos métodos según su concentración y características que presente. Uno de los métodos más sencillos es la sedimentación que emplea un tanque grande con suficiente capacidad, en el que los sólidos que vayan a fondo durante un tiempo de retención extenso (se han establecido tiempo de 2 – 4 horas y velocidades de flujo promedias de 1 pie/min más o menos) y sean recogidos por una placa ubicada en forma inclinada.<sup>17</sup>

Existen varios equipos de filtros para remover las sustancias sólidas presentes en el agua que mencionaremos de manera concisa:<sup>18</sup>

#### 1.3.4.1 Filtros de lecho graduado convencionales

Se colocan capas de medio filtrante de diferente tamaño en un recipiente. Las partículas más grandes están en la parte inferior y las más pequeñas en la parte superior. Sólo las partículas más pequeñas actúan como filtro, las demás son capas de apoyo solamente. Los medios de filtración más comunes son arena y carbón (grafito). Las partículas de hasta 25 - 50  $\mu\text{m}$  de diámetro pueden ser eliminadas. Estos filtros se pueden obstruir fácil y seriamente con aceite. El aceite debe ser eliminado antes de la filtración.

#### 1.3.4.2 Filtros de alta velocidad, lecho profundo y flujo ascendente.

Este es básicamente un filtro de lecho graduado convencional donde el flujo es ascendente a través de los lechos graduados y con alta velocidad de circulación. El filtro completo actúa como medio filtrante. Los lechos se sostienen con una

---

<sup>17</sup> BLANCO SIMBAQUEBA, Johanna. y DELGADILLO AYA, Claudia L. Metodología integrada para el diseño de un monitoreo de inyección de agua desarrollado en un campo petrolero. TESIS (Ingenieras de petróleos). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingeniería fisicoquímicas, 2006. Pág. 206-207. 261 h.

<sup>18</sup> RACITE Miguel Ángel, Ecología agua de pozos. Scribd 29 de Abril de 2011, disponible en internet en <http://es.scribd.com/doc/54173212/50/Remocion-del-Petroleo-Disperso>. Pág. 36-37. 44 h.

estructura de acero en reticulado, y la arena formará arcos de compresión bajo las mallas de acero. El retro lavado es en el mismo sentido que el flujo. Es precedido por aire para romper los arcos de compresión y expandir el lecho. Partículas tan finas como 5 - 10  $\mu\text{m}$  de diámetro pueden eliminarse sin coagulación, y hasta 1 a 2  $\mu\text{m}$  si se introduce una ayuda coagulante tal como el alumbre. Estos filtros se pueden ensuciar fácil y seriamente con petróleo. Por lo tanto, el petróleo debe separarse antes del filtrado, y deberá instalarse algún medio para evitar el arrastre.

#### 1.3.4.3 Filtros de alta velocidad, lecho profundo y flujo descendente

Estos son iguales que los de flujo ascendente, pero invertidos. Medios filtrantes comunes son la antracita y el granate, donde la diferencia de la gravedad específica mantiene al granate en el fondo. Se pueden separar partículas de hasta 7 - 10  $\mu\text{m}$  sin el uso de coagulantes, y hasta 1 a 2  $\mu\text{m}$  con asistencia.

#### 1.3.4.4 Filtros de Tierra Diatomácea (TD)

La tierra diatomácea (TD) es esencialmente sílice puro, formado por plantas marinas unicelulares fosilizadas. Se alimenta una suspensión de TD dentro del filtro, y la TD forma una torta filtrante sobre la membrana de sostén. La operación del filtro continúa hasta que la caída de presión llega a 35 psi o 240 KPa, cuando se comienza el retro lavado. Tanto el medio de filtración (TD) como el material filtrado se descartan. Debe notarse que:

- Los filtros de TD son los más complicados de todos los filtros usados en campos petroleros en cuanto la operación y mantenimiento.
- Los filtros TD sólo son económicamente viables cuando los sólidos suspendidos son menores que 30 - 50 mg/l.

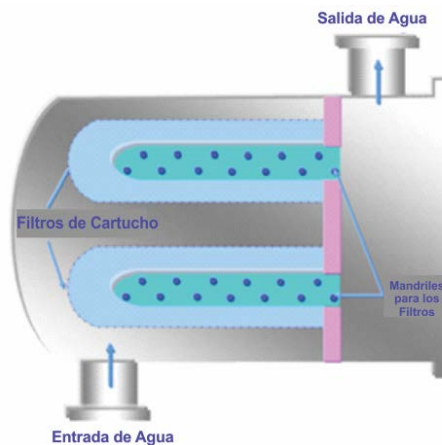
- Los filtros TD retiran el aceite al costo de una vida más corta de operación. Se pueden eliminar partículas de hasta  $0.5 \mu\text{m}$ .

La TD puede presentar un problema logística de suministro. También puede presentar problemas serios la eliminación de TD agotada y sucia.

#### 1.3.4.5 Filtros cartucho

Son recipientes que contienen elementos que pueden ser regenerados de acuerdo al tamaño de la partícula que pasara a través de ellos; en el caso de poder contar con agua que contiene una alta cantidad de solidos suspendidos (mayor a  $2 \text{ mg/L}$ ) es impropcedente utilizar un filtro de este tipo debido a los altos costos de mantenimiento y operación que se tendrían si llegará a presentarse una falla.<sup>19</sup>

Figura 6. Filtro a presión tipo caucho



**Fuente:** BLANCO, J. y DELGADILLO C. *Metodología integrada para el diseño de un monitoreo de inyección de agua desarrollado en un campo petrolero.*

---

<sup>19</sup> BLANCO SIMBAQUEBA, Johanna. y DELGADILLO AYA, Claudia L. Metodología integrada para el diseño de un monitoreo de inyección de agua desarrollado en un campo petrolero. TESIS (Ingenieras de petróleos). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingeniería fisicoquímicas, 2006. Pág. 209. 261 h.

#### 1.3.4.6 Sedimentación

La sedimentación consiste en la separación realizada por la gravedad de las fases sólida y líquida de una suspensión disuelta para alcanzar una concentrada y un líquida claro; ha sido efectiva en lagunas grandes pero no se ha usado de manera amplia hasta hace poco debido a la escasez de coagulantes apropiados.

En proyectos donde se encuentran sólidos suspendidos muy finos se usan métodos de coagulación y sedimentación. El desarrollo de polímeros sintéticos (polielectrolitos) ha ampliado mucho la gama de aguas que pueden tratarse y clarificarse. Los polímeros causan coagulación y floculación hasta que las partículas crecen a un tamaño que se precipitan a una velocidad razonable. La selección de los coagulantes se hace a menudo, basándose en la recomendación de la compañía química, y muchas veces por experiencias.<sup>20</sup>

#### 1.3.5 Biocidas<sup>21</sup>

Son sustancias químicas o de origen natural contra microorganismos nocivos, controlan y reducen la corrosión, previenen el agriamiento del petróleo y gas, preservan los fluidos de perforación y contribuyen a óptimos niveles de producción.

##### 1.3.5.1 Bacterias

Se encuentran en el agua produciendo problemas en el yacimiento y en las tuberías. Éstas son muy diminutas (0.5 mm en diámetro) y hay diferentes tipos. Tienen la facilidad de reproducirse abrumando el fluido y son resistentes a

---

<sup>20</sup> RACITE Miguel Ángel, Ecología agua de pozos. Scribd 29 de Abril de 2011, disponible en internet en <http://es.scribd.com/doc/54173212/50/Remocion-del-Petroleo-Disperso>. Pág. 38-39. 44 h.

<sup>21</sup> Ídem.

cambios de temperaturas (-10 s 100°C), de valores de pH (0 a 10,5) y en las concentraciones de oxígeno (0 – 100%). En el agua se desenvuelven mejor con un pH entre 5 – 9, temperatura < 80°C y se adaptan mucho a las salmueras siendo que tienen mayor afinidad al agua dulce.

En el campo petrolero, las bacterias se clasifican en tres categorías:

1. Aeróbicas: requieren oxígeno para vivir.
2. Anaeróbicas: crecen mejor en ausencia del oxígeno.
3. Facultativas: crecen con o sin oxígeno

#### 1.3.5.2 Control químico

Los productos químicos o matan a las bacterias (bactericidas) o retrasan o inhiben su crecimiento. También se obtienen productos químicos de alcance más amplio como biocidas que matan toda forma de vida, y los bioestatos que retrasan toda forma de vida. El biocida inorgánico más común es el cloro agregado al agua. Los bactericidas orgánicos son las aminas, fenoles clorados, aldehídos y los compuestos de amonio. Se recomienda la evaluación de los distintos productos químicos por un laboratorio como paso inicial en la selección. En la selección de los productos químicos debe considerarse si matar o controlar. Para reductoras de sulfatos se requiere una matanza total y se recomienda un bactericida, mientras que un control (bioestato) de las lamas muchas veces es suficiente. Adicionalmente, muchas bacterias desarrollan una resistencia contra productos químicos particulares con el transcurso del tiempo. El uso de dos bactericidas (en forma alternada) generalmente resuelve este problema, pero es prudente hacer evaluaciones de laboratorio anualmente.

#### 1.4 NORMATIVA EXISTENTE EN COLOMBIA PARA EL VERTIMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN<sup>22</sup>

En Colombia la actividad petrolera está reglamentada por un conjunto de leyes, decretos y resoluciones, las cuales tienen por objeto regular y establecer procedimientos para el desarrollo de la operación de la industria. Esta misma política petrolera ha sufrido grandes cambios en los últimos años en las diferentes áreas, tales como: el marco institucional y funciones de los entes relacionados, estructura empresarial, manejo fiscal de la empresa del estado, estrategia de seguridad, área ambiental, entre otros.

Específicamente para el tema ambiental, la Ley 99 de 1993 determinó que la ejecución de obras y actividades de la industria del petróleo debía contar con una planificación ambiental adecuada para aquellas actividades susceptibles de causar deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente, o modificaciones notorias al paisaje. Para facilitar el proceso de planificación, el Ministerio del Medio Ambiente y el sector petrolero, identificaron la necesidad de definir normas para cada actividad, las cuales orientan la gestión ambiental y unifican los criterios de la operación.

Tal es el caso de la gestión de vertimientos de aguas de producción en los cuerpos de aguas superficiales y al suelo asociado a un acuífero. En el marco de la reglamentación de vertimientos del decreto 1541 de 1978, el Gobierno Nacional, a través del Decreto 3930 de 2010, reestructuro los procedimientos y aspectos relacionados con la normativa de vertimientos.

---

<sup>22</sup> Guía Metodológica de Trámites para el Control de los Vertimientos en los Cuerpos de Agua Superficiales, al Suelo Asociado a un Acuífero y al Medio Marino, en Función de los Trámites y Procedimientos Requeridos para la Obtención de los Permisos de Vertimientos. Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico. Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Octubre de 2011.

#### 1.4.1 Marco legal y reglamentario de los instrumentos de control de los vertimientos.

La **Tabla 2** contiene un resumen del marco nacional normativo y reglamentario relacionado con el control de los vertimientos en la industria petrolera.<sup>23</sup>

Tabla 2. Marco jurídico Nacional

Fuente	Año	Contenido
Decreto - Ley 2811	1974	Código de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. En su capítulo II define la regulación en cuanto a la prevención y control de contaminación del recurso hídrico, desarrolla ampliamente lo referente a los vertimientos de agua residual, estudios de impacto ambiental y procesos sancionatorios. En el Título VIII determina la administración de las aguas y cauces enumera las responsabilidades del gobierno en la administración de las aguas.
Ley 09	1979	Código Sanitario Nacional. Establece procedimientos y medidas para la regulación y control de los vertimientos.
Decreto 1875	1979	Establece medidas de prevención para la contaminación del medio marino.
Decreto 1594	1984	Derogado por el art. 79, Decreto Nacional 3930 de 2010, salvo los arts. 20 y 21. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.
Ley 99	1993	Se crea el Ministerio del Medio Ambiente. Se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. Igualmente establece la base normativa para la implementación de tasas retributivas por vertimientos líquidos puntuales a los cuerpos de agua y la competencia de las corporaciones en la evaluación, control y seguimiento de las descargas de aguas residuales.
Ley 223	1995	Por la cual se expiden normas sobre Racionalización Tributaria y se dictan otras disposiciones.
Ley 373	1997	Sobre ahorro y uso eficiente del agua.
Decreto 1320	1998	Por el cual se reglamenta la consulta previa con las comunidades indígenas y negras para la explotación de los recursos naturales dentro de su territorio. Cap. IV.
Decreto 1729	2002	Por el cual se reglamenta la Parte XIII, Título 2, Capítulo III del Decreto-ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas.
Resolución 1110	2002	Por la cual se fijan las tarifas para el cobro de los servicios de evaluación y seguimiento de licencias, autorizaciones y demás instrumentos de control y manejo ambiental.
Decreto 3100	2003	Modificado por el 3440 de 2004, en lo referente a las tasas retributivas y compensatorias por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales.
Resolución 1433	2004	Planes de saneamiento y manejo de vertimientos, PSMV, y sus modificaciones.

**Fuente:** Modificada de Guía Metodológica de Trámites para el Control de los Vertimientos en los Cuerpos de Agua Superficiales, al Suelo Asociado a un Acuífero y al Medio Marino, en Función de los Trámites y Procedimientos Requeridos para la Obtención de los Permisos de Vertimientos. Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico. Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Octubre de 2011.

<sup>23</sup>En la tabla se incluye la normatividad de manera enunciativa, sin perjuicio de las demás normas aplicables.

**Tabla 2. (Continuación)**

Fuente	Año	Contenido
Resolución 1433	2004	Por el cual se reglamentó el Decreto 3100 de 2003.
Decreto 1220	2005	Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales.
Decreto 3137	2006	Por el cual se crea el Viceministerio de Agua y Saneamiento.
Decreto 330	2007	Por el cual se reglamentan las audiencias públicas ambientales y se deroga el Decreto 2762 de 2005.
Resolución 978	2007	Por la cual se fijan los requisitos para tener derecho a la exclusión del IVA.
Ley 1259	2008	Por medio de la cual se instaure en el territorio nacional la aplicación del comparendo ambiental a los infractores de las normas de aseo, limpieza y recolección de escombros; y se dictan otras disposiciones.
Ley 1333	2009	Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones.
Decreto 3930	2010	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.
Resolución 1280	2010	Por la cual se establece la escala tarifaria para el cobro de los servicios de evaluación y seguimiento de las licencias ambientales, permisos, concesiones, autorizaciones y demás instrumentos de manejo y control ambiental para proyectos cuyo valor sea inferior a 2.115 smmv y se adopta la tabla única para la aplicación de los criterios definidos en el sistema y método definido en el artículo 96 de la Ley 633 para la liquidación de la tarifa.
Decreto 4728	2010	Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010.
Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico	2010	Establece los objetivos, estrategias, metas, indicadores y líneas de acción estratégica para el manejo del recurso hídrico en el país, en un horizonte de 12 años.
Resolución 955	2012	Por el cual se adopta el Formato con su respectivo instructivo para el Registro de Usuarios del Recurso Hídrico.
Resolución 1514	2012	Por la cual adoptan los Términos de Referencia para la Elaboración del Plan de Gestión del Riesgo para el Manejo de Vertimientos.

**Fuente:** Modificada de Guía Metodológica de Trámites para el Control de los Vertimientos en los Cuerpos de Agua Superficiales, al Suelo Asociado a un Acuífero y al Medio Marino, en Función de los Trámites y Procedimientos Requeridos para la Obtención de los Permisos de Vertimientos. Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico. Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Octubre de 2011.

#### 1.4.2 Legislación Vigente.

En la actualidad, el decreto 3930 del 25 de Octubre del 2010, establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el ordenamiento y los vertimientos a este, al suelo y a los alcantarillados; se puede decir que es el eje central de la gestión de vertimientos, y de este se desprenden otras resoluciones, decretos y guías que ayudan a complementar la legislación. Como antecedente, tenemos el decreto 1594 de 1984, que en su momento establecía el desarrollo de un plan de ordenamiento del recurso hídrico, además de determinar algunas consideraciones sobre los vertimientos.

El decreto 3930 deroga al decreto 1594, salvo el artículo 20 que trae la lista de las sustancias que son consideradas de interés sanitario, y el artículo 21 el cual define que es un usuario de interés sanitario, estableciendo que es aquel en cuyos vertimientos se puede encontrar alguna de las sustancias listadas en el artículo 20.

Sin embargo el Decreto 3930 en su artículo 76 fijó un régimen de transición legal que deja vigente transitoriamente del Decreto 1594 los siguientes grupos de artículos:

- **Artículos 37 a 48:** En los cuales se esbozan los criterios de calidad para destinación del recurso.
- **Artículos 72 a 79:** En los que se establecen las normas de vertimientos.
- **Artículos 155, 156, 158, 160, 161:** En los cuales se regula todo el tema de los métodos de análisis y de la toma de muestras.

Dichos artículos seguirán transitoriamente vigentes hasta tanto el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial fije mediante resolución: los usos del agua; los criterios de calidad para cada uso; las normas de vertimiento a los cuerpos de agua, aguas marinas, alcantarillados públicos y al suelo; y el Protocolo para el Monitoreo de los Vertimientos en Aguas Superficiales y Subterráneas.

Adicional a eso, el decreto 4728 modificó parcialmente algunos artículos del 3930, en lo concerniente a los plazos establecidos por los decretos 28, 34, 35, 52, 54, 61, 77 y 78 y deroga el numeral 21 del artículo 42 del Decreto 3930.

#### 1.4.3 Normas de calidad de los Vertimientos.

Según el Artículo 72 del decreto 1594 del 26 de Junio de 1984, todo vertimiento a un cuerpo de agua debe cumplir por lo menos con las normas descritas en la **Tabla 3:**

Tabla 3. Normas de calidad de agua de los vertimientos

Referencia	Usuario Existente	Usuario Nuevo
PH	5 a 9 Unidades	5 a 9 Unidades
Temperatura	< 40 °C	< 40 °C
Material flotante	Ausente	Ausente
Grasas y aceites	Remoción > 80% en carga	Remoción > 80% en carga
Solidos suspendidos industriales	Remoción > 50% en carga	Remoción > 80% en carga
Demanda bioquímica de Oxígeno para desechos industriales	Remoción > 20% en carga	Remoción > 80% en carga
Caudal máximo	1.5 veces el caudal promedio horario	

Fuente: Modificada de Decreto 1594 del 26 de Junio de 1984.

De acuerdo al artículo 74 del mismo decreto, las concentraciones para el control de la carga de las sustancias se encuentran relacionadas en el **Tabla 4**:

Tabla 4. Concentraciones para el control de la carga máxima permisible

Sustancia	Expresada como	Concentración (mg/l)
Arsénico	As	0,5
Bario	Ba	5,0
Cadmio	Cd	0,1
Cobre	Cu	3,0
Cromo	Cr <sup>+6</sup>	0,5
Compuestos Fenólicos	Fenol	0,2
Mercurio	Hg	0,02
Níquel	Ni	2,0
Plata	Ag	0,5
Plomo	Pb	0,5
Selenio	Se	0,5
Cianuro	CN-	1,0
Difenil Policlorados	Concentración de agente activo	No detectable
Mercurio Orgánico	Hg	No detectable
Tricloroetileno	Tricloroetileno	1,0
Cloroformo	Extracto Carbón Cloroformo (ECC)	1,0
Tetracloruro de Carbono	Tetracloruro de Carbono	1,0
Dicloroetileno	Dicloroetileno	1,0
Sulfuro de Carbono	Sulfuro de Carbono	1,0
Otros compuestos organoclorados, cada variedad	Concentración de agente activo	0,05
Compuestos organofosforados, cada variedad	Concentración de agente activo	0,1
Carbamatos		0,1

Fuente: Modificada de Decreto 1594 del 26 de Junio de 1984.

La carga de control de un vertimiento que contenga las sustancias de que se muestran en el **Tabla 4**, se calculará mediante la aplicación de las siguientes ecuaciones:

Ecuación 1.  $A = (Q) * (CDC) * (0,0864)$

Ecuación 2.  $B = (Q) * (.CV) * (0,0864)$

Donde,

A = Carga de control, kg/día.

Q = Caudal promedio del vertimiento, l/seg.

B = Carga en el vertimiento, kg/día.

CDC = Concentración de control, mg/l.

CV = Concentración en el vertimiento, mg/l.

0.0864 = Factor de conversión.

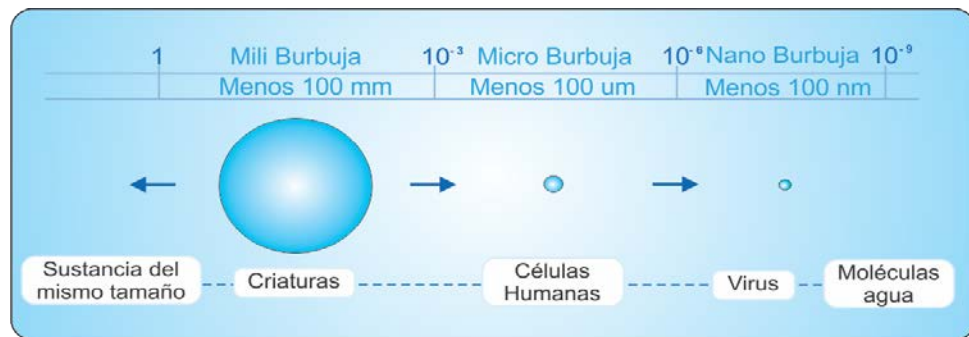
La carga máxima permisible (CMP) será el menor de los valores entre A y B.

## 2 MICROBURBUJAS

### 2.1 GENERALIDADES<sup>24</sup>

Una microburbuja (Ver **Figura 7**) se considera aquella burbuja fina con un diámetro de  $1\mu\text{m}$  a  $100\mu\text{m}$ . La flotabilidad de las burbujas es proporcional al volumen de aire contenido en ella, las burbujas de  $1\text{ mm}^2$  flotan a una velocidad 3610 veces más rápido que una microburbuja, la cual flota a una velocidad de  $0.0001\text{ ft/s}$ , permaneciendo en el agua por más tiempo (Ver **Figura 8.a**).

Figura 7. Relación tamaños de burbujas

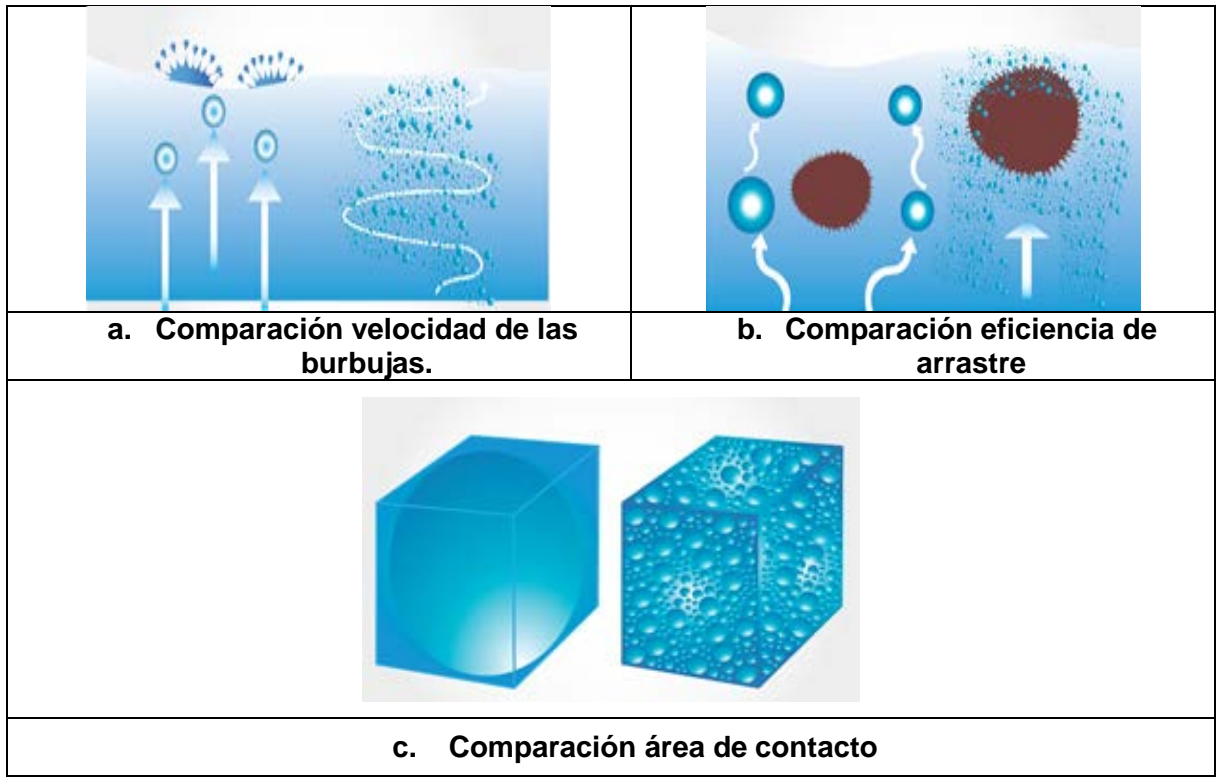


Fuente: Modificada de [www.win2solholdings.com](http://www.win2solholdings.com)

A medida que las microburbujas flotan, capturan las partículas suspendidas en el líquido llevándolas a la superficie (Ver **Figura 8.b**). Dado que dichos sólidos en suspensión no son uniformes en tamaño ni forma, las burbujas grandes fallan en atraparlos, en cambio, las microburbujas pueden penetrar en pequeños espacios de los contaminantes, envolviéndolos en su totalidad en una bola de pequeñas burbujas y haciéndolos flotar.

<sup>24</sup> [www.win2solholdings.com](http://www.win2solholdings.com)

Figura 8. Características de las burbujas según su tamaño



Fuente: [www.win2solholdings.com](http://www.win2solholdings.com)

Cuando un milímetro cúbico de agua se llena de microburbujas, el área de contacto entre el agua y las burbujas es 10.000 veces mayor que el área de contacto de una burbuja normal (1mm de diámetro), de esta manera se aumenta dramáticamente la tasa de transferencia de gas (Ver **Figura 8.c**).

### 2.1.1 Características de las Microburbujas.<sup>25</sup>

En comparación con las burbujas de tamaños milimétricos, las microburbujas tienen características diferentes como resultado de su pequeño tamaño, tales como las presentadas a continuación:

<sup>25</sup> Development of Advanced Water Treatment Technology Using Microbubbles. Pan Li. October 2006

#### 2.1.1.1 Alta área interfacial específica.

El área interfacial específica se define como el área superficial de las burbujas por unidad de volumen de dispersión gas-líquido, y las microburbujas se caracterizan por tener un alta área interfacial. Depende de la fracción volumétrica del gas en el líquido ó hold-up del gas,  $\epsilon$ , y del diámetro de burbuja,  $d_b$ . Ambas propiedades dependen a su vez de las propiedades físicas y de la geometría del sistema.

Así, suponiendo burbujas esféricas, el área interfacial específica se puede calcular mediante la siguiente ecuación<sup>26</sup>:

Ecuación 3. 
$$a = \frac{6\epsilon_G}{d_{b,32}}$$

donde  $\epsilon_G$  [-] es la retención de gas que se define como la fracción de gas en una dispersión de gas en líquido, y  $d_{B, 32}$  [m] es el diámetro medio de burbuja.

#### 2.1.1.2 Baja velocidad de elevación.

Para burbujas pequeñas y esféricas ( $Re < 0,1$ ), el valor de la velocidad de elevación se puede calcular usando la ley de Stoke (Ver **Ecuación 2.6**). La ley de Stoke sólo es aplicable a las pequeñas burbujas con superficie inmóvil. Para el caso claro en el que la burbuja tiene una superficie móvil, a menudo se utiliza la siguiente ecuación Hadamard-Rybczynski

Ecuación 4. 
$$V_t = \frac{gD^2(\rho_f - \rho_a)}{14\mu}$$

Las microburbujas con el radio de 10  $\mu\text{m}$  se elevan con una velocidad de aproximadamente 50  $\mu\text{m/s}$ . Tal velocidad de ascenso lento conduce a mayor tiempo de residencia y, por lo tanto, mayor retención de gas que se asocia con

---

<sup>26</sup> Determinación del Área Interfacial Específica Local en Biorreactores por un método Electroópico. Departamento de Bioingeniería, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología del Instituto Politécnico Nacional. México D.F.

mayor área interfacial específica. Las burbujas más grandes tienen mayores velocidades de elevación y tiene formas como elipsoides o tapas esféricas.

#### 2.1.1.3 Alta presión interna.

La diferencia de presión dentro de la microburbuja y fuera de esta es muy alta. La presión del gas dentro de la burbuja es mayor que la del exterior debido a la tensión superficial. La magnitud de la diferencia de presión,  $\Delta P$ , se puede predecir de acuerdo con la ecuación de Young-Laplace de la siguiente manera,

Ecuación 5. 
$$\Delta P = \frac{4\sigma}{d_b}$$

donde  $\sigma$  [N/m] es la tensión superficial del líquido. Entre más pequeña es la burbuja, mayor es la presión en el interior.

#### 2.1.2 Métodos de Generación de Microburbujas .

En general, existen tres formas de generación de microburbujas<sup>27</sup>.

1. Presurización: El método de generación de Microburbujas de tipo presurización está basado en la ley de Henry. Utiliza la compresión del aire para disolver aire en el líquido, este se libera posteriormente a través de un sistema de boquilla especial. Posteriormente estas burbujas crecen a través de la disolución rápida del líquido sobresaturado.

Este método de generación de microburbujas se ha aplicado a la industrial del tratamiento de aguas residuales, y es conocido como flotación por aire disuelto (DAF).

---

<sup>27</sup> Microbubble Generation. Department of Chemical and Process Engineering, University of Sheffield, Mappin Street, Sheffield S1 3JD, United Kingdom. Institute of Thermomechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague, Czech Republic.

2. Flujo Giratorio: La tercera clase forma las microburbujas mediante el bombeo de agua en dirección tangencial al flujo de gas, el agua fluye en un movimiento rotacional a lo largo de la pared interior del equipo, generando un flujo altamente giratorio para crear una presión muy baja en el centro de un vórtice que cavita, lo cual resulta en el rompimiento del vórtice cerca del orificio y la generación de burbujas bastante finas. El rompimiento se da, ya sea con vibraciones mecánicas, enfoque de flujo u oscilación de fluido.
  
3. Cavitación: La cavitación o aspiraciones en vacío es un efecto hidrodinámico que se produce cuando el agua pasa a gran velocidad por una arista afilada, produciendo una descompresión del fluido debido a la conservación de la constante de Bernoulli. Puede ocurrir que se alcance la presión de vapor del líquido de tal forma que las moléculas que lo componen cambian inmediatamente a estado de vapor, formándose microburbujas o, más correctamente, cavidades.

La segunda clase utiliza ultrasonidos de potencia para inducir la cavitación a nivel local en los puntos de rarefacción extrema. La cavitación se produce por medio de bombas, hélices, e impulsores (Tubo Venturi).

Si por medio de una bomba se mueve un fluido a través de un tubo Venturi, se produce simultáneamente un aumento de la velocidad y una disminución de presión en la parte más angosta del equipo. Cuando aguas abajo se recupera la presión, el gas aspirado colapsa produciendo pequeñas burbujas.

### 2.1.3 Áreas de Aplicación.

Las microburbujas, debido a su tamaño extremadamente pequeño y sus características asociadas, están ganando cada vez más atención en diversos campos, tales como peces y cultivo de moluscos, la medicina, la purificación del agua, etc.

Las principales aplicaciones de microburbujas para tratamiento de aguas se pueden dividir en dos categorías: la flotación de aire y el suministro de oxígeno.

1. Flotación: Este es un proceso de separación en donde las burbujas de aire capturan partículas sólidas parcialmente hidrófobas y los llevan a la superficie para su separación o eliminación.

En un principio, la separación por flotación era aplicada al procesamiento de minerales, más recientemente se ha ganado la atención para el tratamiento de aguas residuales. La flotación de aire se utiliza como alternativa de la sedimentación para eliminar las partículas. El uso de la flotación es, por lo tanto, una alternativa a la sedimentación por gravedad.

2. Suministro de Oxígeno: El oxígeno se suministra para bajar el enriquecimiento de nutrientes, la concentración elevada de nitrógeno y el fósforo en lagunas, ya que representan un grave problema ecológico. El crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas como consecuencia del exceso de nutrientes disminuye la concentración de oxígeno disuelto.

## 2.2 FLOTACIÓN

La flotación con aire ha sido ampliamente usada a lo largo de los últimos años en diferentes tipos de industrias y procesos, tratando residuos de una amplia variedad de fuentes. Este proceso, en todas sus variaciones, es una forma eficiente para separar físicamente partículas pequeñas de un medio de inmersión, las cuales se adhieren a una burbuja de aire.

La primera aplicación en el área del tratamiento de aguas residuales se dio para la remoción de sólidos suspendidos, fibras y partículas pequeñas de baja densidad; más reciente aún, se implementó para remover grasas y aceites, demostrando ser un proceso seguro y eficiente para la separación física de estos componentes.

Para efectuar la separación, la flotación utiliza la diferencia de densidades entre el agua, las burbujas y las pequeñas partículas de sólidos (o gotas de aceite). Las principales características son: la introducción de burbujas finas de gas en el fluido; una zona de turbulencia mínima donde las partículas se adhieren a las burbujas formando un aglomerado; y dado que el aglomerado formado tiene una densidad más baja que el medio en el que está inmerso, este asciende a la superficie formándose sobre esta una espuma que se remueve por un medio de un colector.

Aunque existen diferentes métodos de flotación, la aplicación de algunos está sujeta a varias limitaciones operacionales y económicas. Las unidades de flotación están clasificadas por la forma en que el gas se introduce en el agua, a continuación se relacionan cinco tipos:

1. Flotación con Aire Disuelto: El gas es precipitado en una solución sobresaturada, como resultado de una reducción de presión.
2. Flotación con Aire Inducido (disperso): El gas y el líquido son mezclados mecánicamente para inducir la formación de la burbuja.
3. Flotación Espumosa: El gas es directamente inyectado en el fluido por medio de un rociador.
4. Flotación Electrolítica: Las burbujas son generadas por la electrólisis del agua.
5. Flotación Aspiraciones al Vacío: El gas se libera de una solución saturada por una presión negativa o succión.

Solo los primeros cuatro sistemas son usados para el tratamiento de aguas residuales, siendo la flotación con gas disperso o inducido (IAF<sup>28</sup>) y la flotación con gas disuelto (DAF<sup>29</sup>), los de uso comercial más común.

La separación de partículas por flotación se relaciona con las mismas leyes de la sedimentación, y se demuestra que para flujo laminar, el movimiento vertical de una partícula a través de un fluido puede ser descrito por la Ley de Stokes. A continuación abordamos el concepto de la Teoría de la Flotación.

### 2.2.1 Teoría de la Flotación

La ecuación que gobierna en la separación con flotación de aire, como en todos los procesos controlados por la gravedad, es la “ley de Stokes”, la cual se usa de manera inversa para calcular la velocidad de elevación del aglomerado:

Ecuación 2.6. 
$$V_t = \frac{gD^2(\rho_f - \rho_a)}{18\mu}$$

Donde,

$V_t$  = Velocidad final de ascensión del aglomerado, [cm/s].

$g$  = gravedad constante, [980 cm/s<sup>2</sup>].

$D$  = diámetro efectivo del aglomerado, [cm].

$\rho_a$  = densidad del aglomerado, [g/cm<sup>3</sup>].

$\rho_f$  = densidad del fluido, [g/cm<sup>3</sup>].

$\mu$  = viscosidad de la fase acuosa, [cp].

---

<sup>28</sup> Por sus siglas en inglés “*Induced (dispersed) Air Flotation*”.

<sup>29</sup> Por sus siglas en inglés “*Dissolved Air Flotation*”.

La ecuación anterior permite observar que al chocarse y adherirse finas burbujas a las partículas, en comparación a un proceso de sedimentación, decrece la densidad efectiva del aglomerado resultante y aumenta su diámetro efectivo, y se refleja en el aumento de la velocidad de ascensión de la partícula.

El proceso de flotación consta de los siguientes pasos para llevarse a cabo:

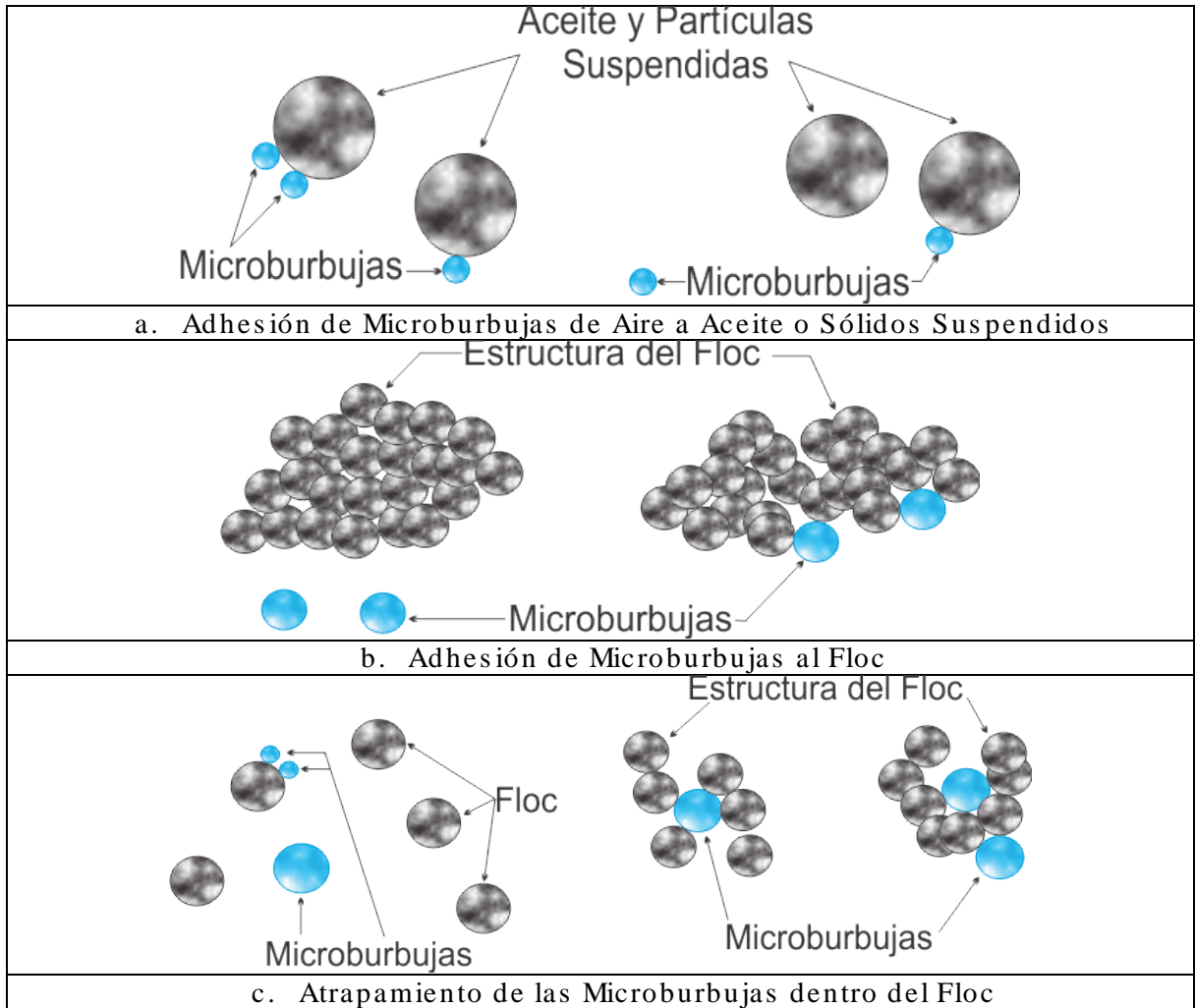
1. Generación y distribución de las burbujas de gas en el agua residual.
2. Colisión entre la burbuja de gas y la materia suspendida (partículas sólidas y/o gotas de aceite).
3. Adhesión de las burbujas finas a la superficie de la materia suspendida.
4. Arrastre de otras partículas que se encuentran en la trayectoria de los aglomerados que ya se han formado.
5. Ascenso del aglomerado a la superficie para su remoción.

La eficiencia de remoción de sólidos suspendidos de aguas residuales por flotación depende principalmente de la estructura y de las propiedades superficiales de las partículas.

El método por el cual las burbujas de gas hacen contacto con las partículas del agua residual implica adhesión o entrapamiento de las burbujas (Ver **Figura 9**). El mecanismo dominante, en el contacto entre partículas y aire, depende del tamaño de las burbujas, de la tensión superficial entre gas y sólido, de la interfaz gas - líquido y de características de las partículas tales como densidad, diámetro y área superficial.

Factores que afectan el diseño de unidades de flotación incluyen concentración de sólidos, cantidad de aire, tasa de alimentación y velocidad de elevación de las partículas. En muchos casos, debido a la variabilidad de las aguas residuales, los parámetros de diseño se determinan mediante análisis de laboratorio con plantas piloto.

Figura 9. Mecanismos de formación y adhesión de las burbujas de aire en la flotación por aire disuelto



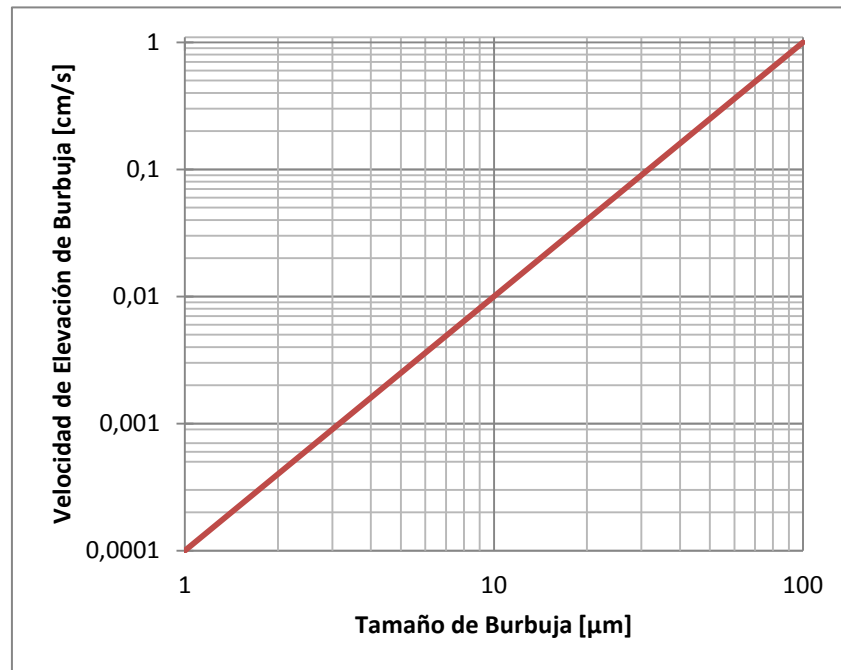
**Fuente:** Modificada WANG Lawrence, et al., *Handbook of Environmental Engineering - Flotation Technology*. Volumen 12. Londres, Inglaterra Año 2010.

### 2.2.1.1 Velocidad de Elevación.

Los sistemas de tratamiento de aguas de producción en la industria petrolera normalmente trabajan con altas cantidades de agua, por lo tanto, el tiempo de retención se convierte en un punto importante del proceso. En el caso específico de los sistemas de flotación, este depende principalmente de la velocidad de elevación de las burbujas en el líquido, la velocidad se puede calcular usando la

ley de Stokes. Los resultados del cálculo de la velocidad de elevación dependiendo del diámetro de burbuja, se muestran en la **Figura 10**.

Figura 10. Velocidad de elevación de burbujas de aire en agua del grifo



**Fuente:** Modificada WANG Lawrence, et al., *Handbook of Environmental Engineering - Flotation Technology*. Volumen 12. Londres, Inglaterra Año 2010.

Estudios<sup>30</sup> han comparado las velocidades de diseño calculadas para los sistemas de flotación y sedimentación, en donde se toman en cuenta el tiempo de retención (Ver **Tabla 5**) que muestran la importancia del uso de unidades de flotación.

---

<sup>30</sup> Beychock MR (1967) *Aqueous wastes from petroleum and petrochemical plants*. John Wiley & Sons, New York, NY.

Tabla 5. Comparación parámetros en sistemas de flotación con sedimentación

Parámetro	Unidades	Sedimentación Natural	Flotación con Aire
Tiempo de retención	[h]	2 - 3	0,5
Velocidad de Partícula	[gal/min/ft <sup>2</sup> ]	0,5 - 1,0	2,0
	[ft/min]	0,07 - 0,13	0,27

**Fuente:** Modificada WANG Lawrence, *et al.*, *Handbook of Environmental Engineering - Flotation Technology*. Volumen 12. Londres, Inglaterra Año 2010.

La carga hidráulica también es un parámetro común de diseño. Si se observa detalladamente, si las unidades utilizadas [gal/min/ft<sup>2</sup>] se convierten a una base común [ft<sup>3</sup>/ft<sup>2</sup>/min], mediante la cancelación se obtiene unidades de [ft/min], que es equivalente a las unidades de velocidad.

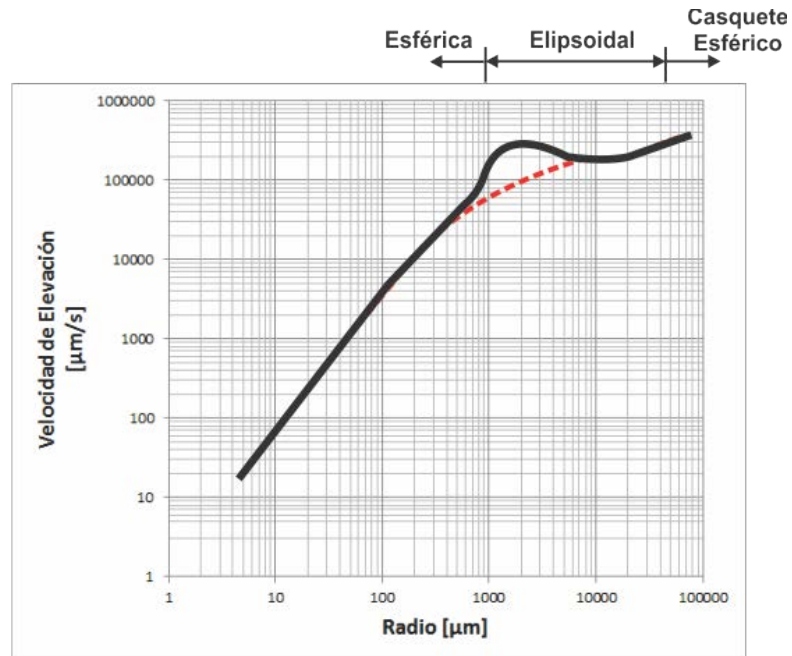
Estudios<sup>31</sup> revelan que la velocidad elevación real de burbujas de tamaño mayor que 150 µm, es considerablemente más rápida que lo predicho por la Ley de Stokes ya que asume una forma elíptica para la burbuja, lo que ofrece menos resistencia al flujo.

La **Figura 11** muestra la velocidad de elevación de las burbujas al variar el tamaño de las mismas, y tiene en cuenta diámetros grandes de burbuja. Como se puede ver, las burbujas de diámetros menores a 1000 µm tienen velocidad de elevación de menos de 10 centímetros por segundo, mientras que burbujas de algunos centímetros de diámetro (2 a 5 cm) tienen velocidades muy superiores. El gráfico ilustra la tasa de aumento de las burbujas que van de 100 a 50.000 µm.

---

<sup>31</sup> Ramirez ER (1979) Comparative physicochemical study of industrial waste-water treatment by electrolytic dispersed air and dissolved air flotation technologies. Proceedings of Purdue industrial waste conference, vol 34. Purdue University, West Lafayette, IN, p 699

Figura 11. Velocidad de elevación de burbujas de diámetros mayores



**Fuente:** Modificada WANG Lawrence, et al., *Handbook of Environmental Engineering - Flotation Technology*. Volumen 12. Londres, Inglaterra Año 2010.

### 2.2.1.2 Solubilidad del Gas.

La clave de un sistema de flotación con aire disuelto es la disolución del aire (o de cualquier otro gas que se considere adecuado para el proceso) bajo presión y la reducción de esta presión para formar las burbujas. En la **Tabla 6** se presentan las solubilidades de diversos gases y su respectiva concentración.

Tabla 6. Solubilidad de varios gases en agua a 24 °C y 1 atm

Gas	Porcentaje en Peso [mg/l]	Porcentaje en Volumen [ml/l]
N <sub>2</sub>	17,8	15,5
O <sub>2</sub>	40,1	30,8
CO <sub>2</sub>	1493	831

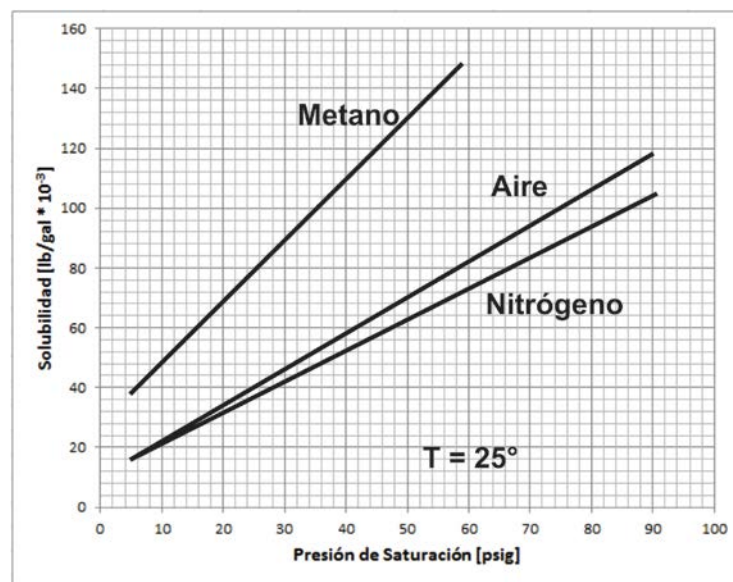
**Fuente:** Modificada WANG Lawrence, et al., *Handbook of Environmental Engineering - Flotation Technology*. Volumen 12. Londres, Inglaterra Año 2010.

La solubilidad mide la concentración del gas en el agua residual y generalmente la cantidad de gas que entra en solución obedece a la Ley de Henry (Ver **Ecuación 2.7**), la cual dice que la concentración de un gas disuelto es función de su presión relativa:

Ecuación 2.7. 
$$p = kC$$

Donde  $p$  es la presión parcial del gas,  $C$  es la concentración del gas disuelto en la solución, y  $k$  es la constante de la Ley de Henry. Las solubilidades de diferentes gases se pueden observar en la **Figura 12**.

Figura 12. Solubilidad de diferentes gases en agua como función de la presión



**Fuente:** WANG Lawrence, et al., *Handbook of Environmental Engineering - Flotation Technology. Volumen 12*. Londres, Inglaterra Año 2010.

Este parámetro también es función de la temperatura y la concentración de sólidos disueltos (Ver **Tabla 7** y **Tabla 8**). La solubilidad del aire en agua destilada, por ejemplo, se reduce el 45% cuando la temperatura se eleva de 0 a 30 ° C. Además, la solubilidad del oxígeno disminuye 19% cuando su salinidad aumenta de 0 a 20.000 mg/L.

Tabla 7. Volumen y peso del aire disuelto en el agua por 1.000 galones a 30 psi

Temperatura		Sg a 1 atm		f = 100%		f = 90%		f = 80%		f = 70%		f = 60%	
° C	° F	lb	ft <sup>3</sup>	lb	ft <sup>3</sup>	lb	ft <sup>3</sup>	lb	ft <sup>3</sup>	lb	ft <sup>3</sup>	lb	ft <sup>3</sup>
0	32	0,311	3,86	0,95	11,7	0,85	10,6	0,76	9,5	0,66	8,2	0,57	7,1
10	50	0,245	3,15	0,75	9,6	0,67	8,6	0,6	7,7	0,52	6,7	0,45	5,8
20	68	0,203	2,7	0,61	8,2	0,56	7,4	0,5	6,6	0,43	5,8	0,37	4,9
30	86	0,175	2,4	0,53	7,3	0,48	6,6	0,43	5,9	0,37	5,1	0,32	4,4
40	104	0,155	2,2	0,47	6,7	0,43	6	0,38	5,4	0,33	4,7	0,28	4
50	122	0,142	2,09	0,43	6,4	0,39	5,7	0,35	5,1	0,3	4,5	0,26	3,8
60	140	0,133	2,01	0,4	6,1	0,36	6,6	0,32	4,9	0,28	4,3	0,24	3,7
70	158	0,128	2	0,39	6,1	0,35	5,5	0,31	4,9	0,27	4,3	0,23	3,7
80	176	0,125	2,01	0,38	6,1	0,34	5,5	0,3	4,9	0,27	4,3	0,23	3,7
90	194	0,124	2,05	0,38	6,2	0,34	5,6	0,3	5	0,26	4,4	0,23	3,8
100	212	0,125	2,13	0,38	6,5	0,34	5,8	0,3	5,2	0,27	4,5	0,23	3,9
$f \frac{(30 + 14,7)}{14,7}$				3,04		2,74		2,44		2,13		1,83	

Fuente: Modificada WANG Lawrence, et al., *Handbook of Environmental Engineering - Flotation Technology*. Volumen 12. Londres, Inglaterra Año 2010.

Tabla 8. Volumen y peso del aire disuelto en el agua por 1.000 galones a 65 psi

Temperatura		Sg a 1 atm		f = 100%		f = 90%		f = 80%		f = 70%		f = 60%	
° C	° F	lb	ft <sup>3</sup>	lb	ft <sup>3</sup>	lb	ft <sup>3</sup>	lb	ft <sup>3</sup>	lb	ft <sup>3</sup>	lb	ft <sup>3</sup>
0	32	0,311	3,86	1,69	20,9	1,52	18,8	1,35	16,8	1,18	14,7	1,01	12,6
10	50	0,245	3,15	1,33	17,1	1,2	15,4	1,06	13,7	0,93	12	0,8	10,3
20	68	0,203	2,7	1,1	14,6	0,99	13,2	0,88	11,7	0,77	10,3	0,66	8,8
30	86	0,175	2,4	0,95	13	0,86	11,7	0,76	10,4	0,67	9,1	0,57	7,8
40	104	0,155	2,2	0,84	11,9	0,76	10,7	0,67	9,5	0,59	8,4	0,51	7,2
50	122	0,142	2,09	0,77	11,3	0,69	10,2	0,62	9,1	0,54	7,9	0,46	6,8
60	140	0,133	2,01	0,72	10,9	0,65	9,8	0,58	8,7	0,51	7,6	0,43	6,6
70	158	0,128	2	0,7	10,8	0,63	9,8	0,56	8,7	0,49	7,6	0,42	6,5
80	176	0,125	2,01	0,68	10,9	0,61	9,8	0,54	8,7	0,48	7,6	0,41	6,6
90	194	0,124	2,05	0,67	11,1	0,6	10	0,54	8,9	0,47	7,8	0,4	6,7
100	212	0,125	2,13	0,68	11,6	0,61	10,4	0,54	9,3	0,48	8,1	0,41	6,9
$f \frac{(65 + 14,7)}{14,7}$				5,42		4,88		4,34		3,8		3,26	

Fuente: Modificada WANG Lawrence, et al., *Handbook of Environmental Engineering - Flotation Technology*. Volumen 12. Londres, Inglaterra Año 2010.

La cantidad de gas que teóricamente se libera de la solución cuando la presión es reducida a 1 atm viene dada por la siguiente ecuación:

Ecuación 2.8. 
$$S = S_g \left( \frac{P}{14,7} + 1 \right)$$

Donde S es el gas liberado a la presión atmosférica (mg / L), S<sub>g</sub> es la saturación de gas a presión atmosférica (mg / L), y P es la presión relativa de presurización (psig).

Dado que los sistemas de disolución no son 100% eficientes, hay que modificar la ecuación anterior mediante la inclusión de *f*, un "factor de eficiencia de disolución".

Ecuación 2.9. 
$$S = S_g \left( \frac{fP}{14,7} + 1 \right)$$

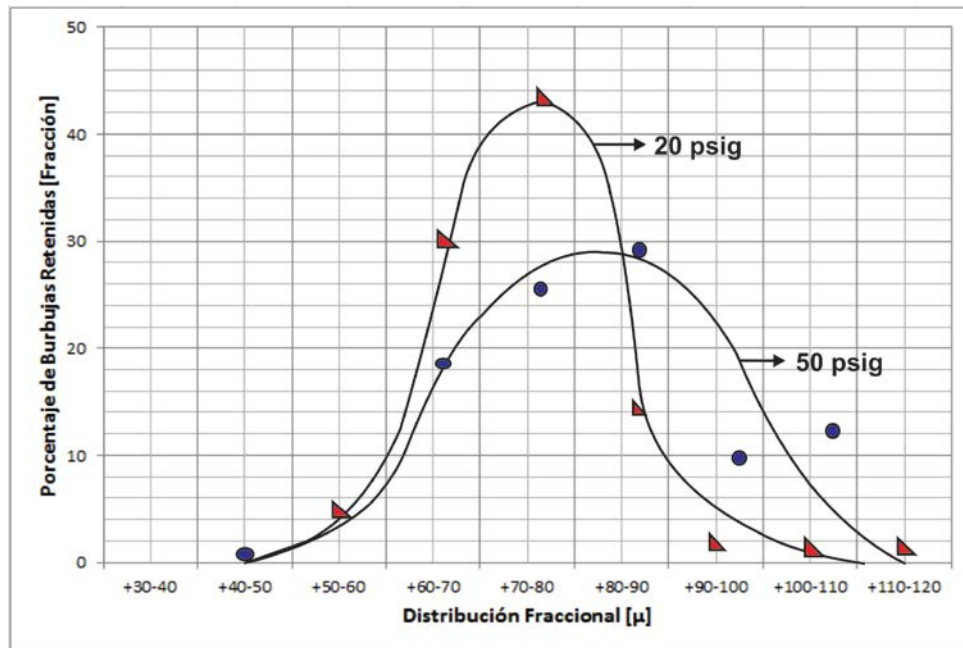
La fracción de saturación (*f*) depende de la turbulencia, del tiempo de contacto, de la superficie de contacto entre el aire y el agua, entre otros factores. Generalmente se adopta para el diseño de unidades de flotación, un valor de *f* = 0,5.

#### 2.2.1.3 Tamaño de Burbuja.

En operaciones de transferencia de masa "gas-líquido", el aumento de área interfacial es uno de los parámetros clave para aumentar la eficiencia de la operación. En el caso de la flotación, la variable dependiente más importante es el tamaño de burbuja, ya que además de presentar mayor superficie para una misma cantidad de aire, necesitan desplazar menor cantidad de agua de la superficie de la partícula donde se van a adherir.

El tamaño de la burbuja depende, principalmente, de la presión inicial del sistema. Entre mayor presión inicial tenga este, menor energía debo suministrar antes de formar las burbujas. La energía decrece al disminuir la tensión superficial de la burbuja o al aumentar la presión en su estado inicial.

Figura 13. Distribución del tamaño de las burbujas de aire liberadas en una cámara de flotación en pruebas de flotación de laboratorio



Fuente: Modificada WANG Lawrence, et al, *Handbook of Environmental Engineering - Flotation Technology. Volumen 12.* Londres, Inglaterra Año 2010.

Investigadores<sup>32</sup>, generaron los datos de distribución de tamaño de las burbujas de esta gráfica que muestra el efecto de la presión de disolución del aire en el agua, basándose en pruebas de laboratorio (Ver **Figura 13**). Los tamaños de burbuja reportados variaron de aproximadamente 45 a 115  $\mu\text{m}$  con diámetros medios de 75 y 85  $\mu\text{m}$  con presiones de saturación de 20 y 50 psi respectivamente.

Otra variable importante con respecto al tamaño de burbuja es la relación existente entre el tiempo de contacto en una cámara de flotación entre las burbujas y las partículas, y depende de la velocidad de elevación de estas, que a su vez, es proporcional al cuadrado del diámetro de las mismas (Ver **Ecuación**

---

<sup>32</sup> Vrablik ER (1959) Fundamental principles of dissolved air flotation of industrial wastes. Proceedings of Purdue industrial waste conference, vol 14. Purdue University, West Lafayette, IN, p 743

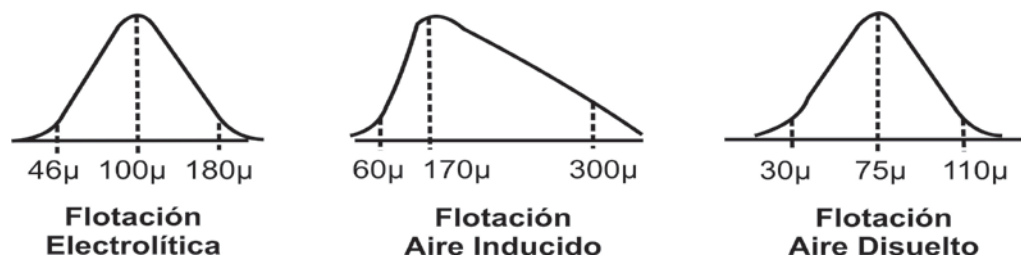
2.6). La eficiencia del proceso mejora si hay presencia de microburbujas, pues el incremento de su densidad numérica y el aumento del tiempo de residencia elevan la probabilidad de colisión y adhesión del sistema partícula/burbuja.

Diferentes investigadores<sup>33</sup> del proceso de flotación también consideran que dependiendo del tipo de gas se ejerce una influencia en el tamaño de burbuja. Mediciones realizadas en los sistemas DAF utilizando CO<sub>2</sub> y aire saturado a una presión de 30 psi, demuestran que 10 segundos después de la liberación, los tamaños de burbuja fueron cinco veces mayor cuando se utilizó el CO<sub>2</sub> respecto a los tamaños generados con el aire, elevándose mucho más rápido las burbujas de CO<sub>2</sub> y creando condiciones de turbulencia en la cámara de flotación.

En el caso específico del uso de nitrógeno en un sistema de flotación<sup>34</sup>, los tamaños de burbuja generados están el orden medio de 82 μm, y en algunos casos hasta de 48 μm, siendo esta variable función del grado de sobresaturación.

También, algunos autores midieron la distribución del tamaño de las burbujas para diferentes sistemas de flotación (Ver **Figura 14**, **Tabla 9** y **Tabla 10**), donde se cubren gran parte de la misma gama de parámetros, y los tamaños de burbuja son del mismo orden de magnitud.

Figura 14. Distribución de tamaño de burbuja en diferentes sistemas de flotación



<sup>33</sup> TRAVERS SM, LOVETT DA (1985) Pressure flotation of abattoir wastewaters using carbon dioxide. Water Res 19:1479.

<sup>34</sup> SATO Y, et al(1979) Removal of emulsified air particles by dissolved air flotation. J Chem Eng Jpn 12:454  
Citados WANG Lawrence, et al., *Handbook of Environmental Engineering - Flotation Technology*. Volumen 12. Londres, Inglaterra Año 2010

**Fuente:** Modificada WANG Lawrence, *et al.*, *Handbook of Environmental Engineering - Flotation Technology. Volumen 12.* Londres, Inglaterra Año 2010.

Tabla 9. Comparación entre varios sistemas de flotación -Ramírez<sup>35</sup>

Parámetro	Procesos de Generación de Burbuja		
	Electrolítica	Aire Disperso	Aire Disuelto
Medida del diámetro de la burbuja 60 dy/cm (mm)	100	170	75
Caudal de elevación de la burbuja ft/min (cm/s)	1 (0,5)	3 (1,5)	0,2 (0,1)
Numero de burbujas/cm <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup>	0,2 X 10 <sup>4</sup>	3,6 X 10 <sup>6</sup>
Área superficial de la burbuja (cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	454	293	800

**Fuente:** Modificada WANG Lawrence, *et al.*, *Handbook of Environmental Engineering - Flotation Technology. Volumen 12.* Londres, Inglaterra Año 2010.

Tabla 10. Comparación entre varios sistemas de flotación – Degremont<sup>36</sup>

Proceso de Flotación	Tamaño de Burbuja [µm]	Consumo de Energía		Tiempo de Retención [min]	Principal Aplicación
		Vatios por volumen tratado [m <sup>3</sup> /h]	Vatios por volumen tratado [gal/min]		
Aspiración mecánica de aire	100 – 500 100 - 1000	20 – 30 100 - 200	4,5 – 6,8 22,5 - 45	2 - 5 2 - 16	Grasa "Diagrama de instalación" de polímeros y de látex o suspensiones de elastómero
Aire disuelto con 20% de recirculación	40 - 70	45 - 60	10,2 – 13,6	20 - 30	Hidrocarburos solventes, fibras, suspensiones finas y partículas floculadas.
Eléctrico	50 - 70	150 - 300	34 - 68	-	Las mismas aplicaciones que las de flotación por aire disuelto en el caso de agua salina caliente

**Fuente:** Modificada WANG Lawrence, *et al.*, *Handbook of Environmental Engineering - Flotation Technology. Volumen 12.* Londres, Inglaterra Año 2010.

#### 2.2.1.4 Relación Sólidos/Aire.

La eficiencia de un sistema de flotación también depende, del valor de la relación entre la cantidad de aire requerida para lograr un determinado grado de

<sup>35</sup> RAMIREZ ER (1979) Comparative physicochemical study of industrial waste-water treatment by electrolytic dispersed air and dissolved air flotation technologies. Proceedings of Purdue industrial waste conference, vol 34. Purdue University, West Lafayette, IN, p 699

<sup>36</sup> DEGREMONT (1979) Water treatment handbook. John Wiley & Sons, New York, NY 44. Schmidt L, Morfopoulos V (1983) Bubble formation in the dissolved air flotation process, paper presented at AIChE Meeting. Houston, TX, May  
Citados WANG Lawrence, *et al.*, *Handbook of Environmental Engineering - Flotation Technology. Volumen 12.* Londres, Inglaterra Año 2010

clarificación y la cantidad de sólidos. Este valor variará con cada tipo de suspensión y se puede determinar, experimentalmente, utilizando una celda de flotación de laboratorio.

La ecuación de diseño para calcular la relación de aire o sólidos suspendidos y/o hidrocarburo en sistemas de flotación con aire disuelto con recirculación es:

Ecuación 2.10. 
$$\frac{A}{S} = \frac{C_s[f(P_a)-1]}{X_f}$$

Dónde:

$A/S$  = kg de aire / kg de sólidos suspendidos y/o hidrocarburo en el afluente.

$C_s$  = Solubilidad del aire en agua [ppm].

$P$  = Presión de saturación absoluta en el tambor de presurización [psig].

$X_f$  = Concentración de sólidos suspendidos y/o hidrocarburo en el afluente [ppm].

$f$  = Coeficiente de la eficiencia del aire [fracción].

En sistemas de presurización con reciclo, todo el aire se imparte a la corriente de reciclo y los contaminantes suspendidos están en la corriente cruda-residuos, por lo que la ecuación debe ser modificada de la siguiente manera:

Ecuación 2.11. 
$$\frac{A}{S} = \frac{RC_s[f(P_a)-1]}{QX_f}$$

Dónde:

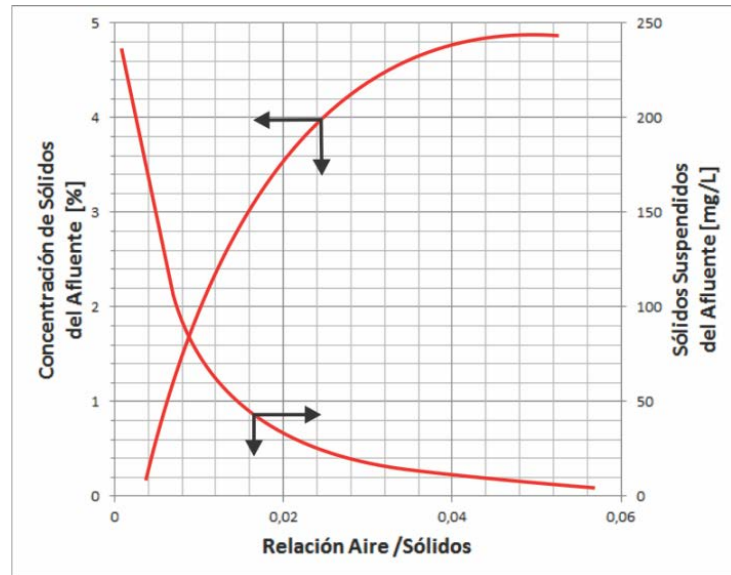
$R$  = Reciclo [ $m^3/h$ ].

$Q$  = Flujo volumétrico a tratar [ $m^3/h$ ].

Para un afluente específico, el valor de  $S_0$  es fijo. La relación  $A/S$  se aumenta incrementando el aire liberado por la despresurización, operando a presiones mayores. De esta manera se puede obtener un efluente de mejor calidad, como se observa en la **Figura 15**. Figuras similares permiten seleccionar el grado requerido

de clarificación o la relación A/S para una concentración específica de sólidos en el efluente.

Figura 15. Relación típica de A/S y sólidos suspendidos



**Fuente:** Modificada Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. *Tratamientos de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Tercera Edición. Bogotá. Febrero de 2004.*

Así mismo, al agregar cantidades insignificantes de aire la remoción de sólidos suspendidos e hidrocarburos es inadecuada y si se agrega demasiado aire se presentarán condiciones de turbulencia que romperán los aglomerados ya formados.

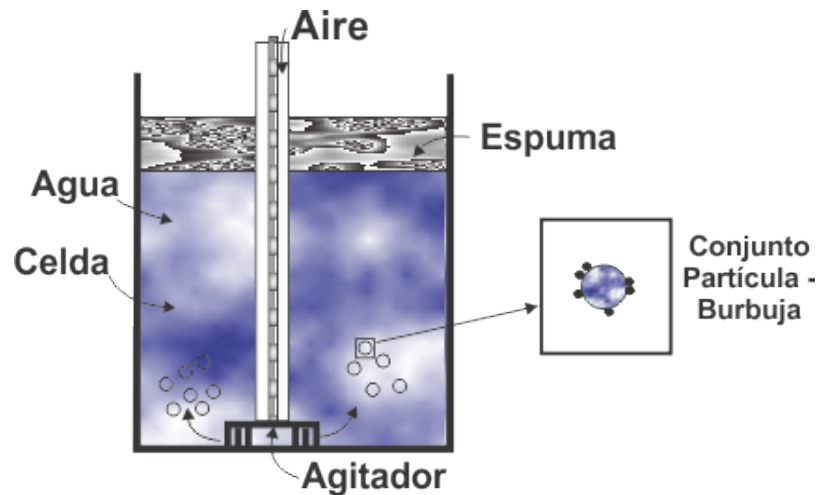
### 2.2.2 Tipos de Flotación

En la literatura se pueden encontrar diferentes tipos de flotación para tratamiento de aguas residuales, tales como: Electrolítica, Espumosa, con Aire Inducido y Aire Disuelto. A continuación se amplía las características de cada uno de ellos.

### 2.2.2.1 Flotación Espumosa.

La separación por medio de la Flotación Espumosa se realiza gracias a la adhesión selectiva de partículas hidrófobas a pequeñas burbujas de gas (aire) que son inyectadas al interior de la celda (Ver **Figura 16**). El conjunto partícula-burbuja asciende a la superficie formando una espuma aceitosa, la cual es removida por medio de paletas giratorias o simplemente por rebose. Las propiedades superficiales de las partículas y las características del medio pueden ser reguladas con ayuda de reactivos.

Figura 16. Diagrama de flotación de espuma



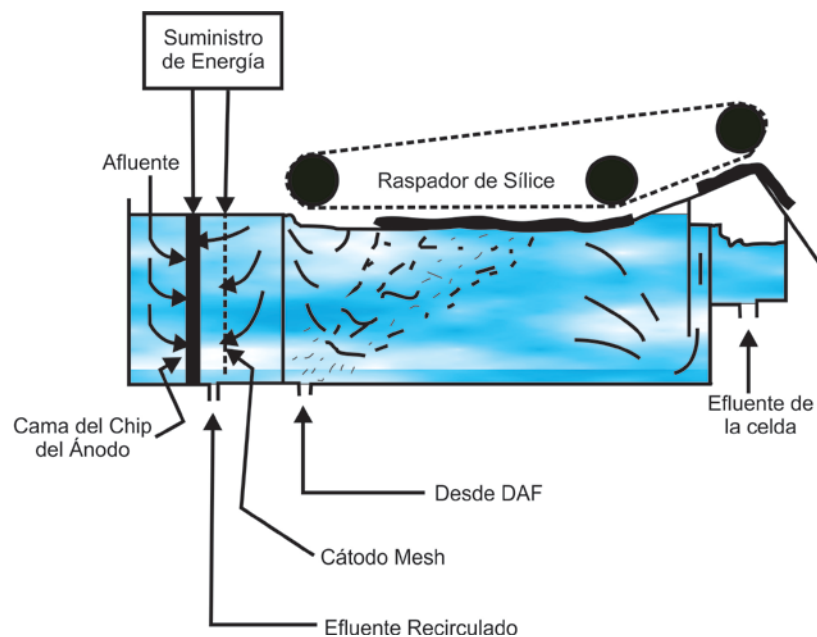
**Fuente:** Modificada WANG Lawrence, et al., *Handbook of Environmental Engineering - Flotation Technology*. Volumen 12. Londres, Inglaterra Año 2010.

Actualmente este tipo de flotación no es comercialmente utilizada por las altas concentraciones de surfactantes requeridas para mejorar la separación, además de la dificultad de separar el surfactante del agua.

### 2.2.2.2 Electroflotación.

La base de la Electroflotación es la generación de burbujas de oxígeno e hidrógeno en una solución acuosa diluida, pasando una corriente directa entre dos electrodos (Ver **Figura 17**). Los gases son generados en los electrodos provocando la electrólisis del agua, donde las burbujas pueden adherirse a la superficie de los flocúlos disminuyendo la densidad del conjunto, y posibilitando su separación por flotación.

Figura 17. Diagrama esquemático de una celda de Electroflotación



**Fuente:** WANG Lawrence, et al., *Handbook of Environmental Engineering - Flotation Technology. Volumen 12*. Londres, Inglaterra Año 2010.

Este sistema presenta una serie de ventajas respecto de otros utilizados comúnmente, como el de flotación por aire disuelto, y es habitual su utilización en combinación con procesos de electrocoagulación y coagulación físico-química, suele tener el inconveniente de la generación conjunta de oxígeno e hidrógeno en el interior del reactor, lo que impide la separación de ambos.

Además del efecto de flotación, este proceso conlleva otras ventajas. Por ejemplo, puede separar emulsiones y puede lograr también la floculación si se elige un material de electrodos adecuado. Las ventajas son las siguientes:

- Evolución controlada y constante del gas.
- Consumo de energía comparativamente inferior.
- Ausencia de piezas cargadas mecánicamente (bombas mezcladoras, etc.)
- Efecto oxidante del oxígeno, que descompone los contaminantes orgánicos
- Flotación mejorada de las sustancias catiónicas mediante el hidrógeno liberado.
- Precipitación de sustancias disueltas mediante reacción electroquímica.
- Los electrodos pueden estar dispuestos para proporcionar una buena cobertura de la superficie del tanque, de este modo se consigue un mezclado uniforme entre las burbujas y el agua.
- Un gran número de burbujas muy pequeñas se forman con mínima turbulencia.
- El gradiente de campo eléctrico entre el electrodo y el sólido floculado puede ser controlado.
- La producción de gas y el tiempo de residencia se controlan fácilmente.

Las principales variables que afectan a la densidad de corriente, tamaño y número de burbujas, etc son los siguientes:

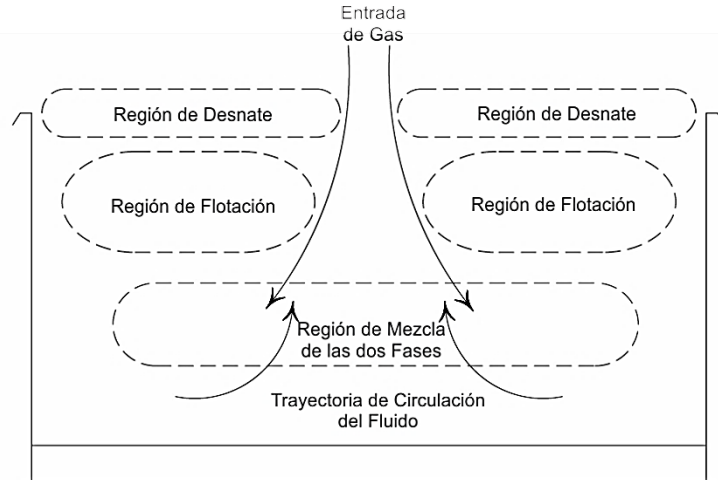
- pH.
- Tipo de electrolito (NaCl, HCl, NaOH).
- Densidad de Corriente.
- Tiempo de retención.

### 2.2.2.3 Flotación con Aire Inducido (Disperso).

En los procesos de flotación por gas inducido, las burbujas son generadas con gas (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, metano, gas natural, etc) o aire y descargadas directamente en el líquido sobre la celda o equipo de flotación a través de un dispositivo inductor hidráulico o por un vórtice creado por rotores mecánicos.

Hay diferentes diseños del sistema de Aire Inducido: eductores hidráulicos, boquillas, impulsores rotativos de alta velocidad y difusores o sistema de homogenización de gas/corriente del líquido. Todos requieren de un medio para generar burbujas de gas de un tamaño y distribución favorable en la corriente de entrada, una región de mezcla de las dos fases para que se genere la colisión entre las burbujas y las partículas a retirar, y una región de flotación o separación que permite que el Floc suba a superficie (Ver **Figura 18**).

Figura 18. Mecanismo de una celda IAF

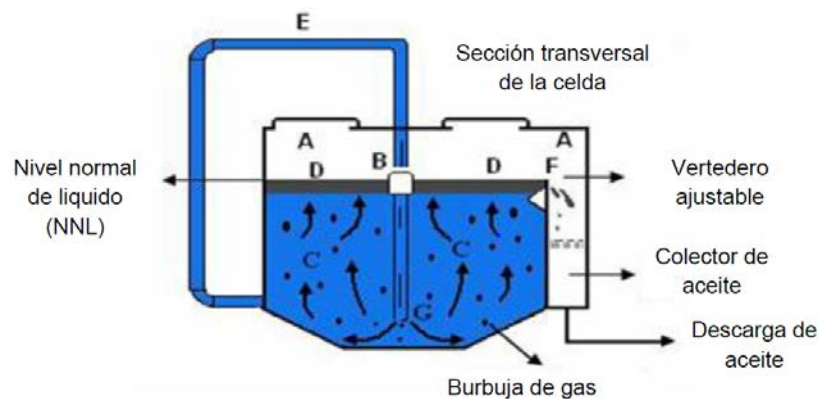


**Fuente:** Modificada Arnold, Ken y Stewart, Maurice. *Surface Production Operations. Design of Oil -Handling Systems and Facilities. Primera Edición. 1999.*

- Unidades de Flotación por Gas Disperso con Eductor Hidráulico: Básicamente, el dispositivo (Ver **Figura 19**) sustrae agua tratada de la

cámara de salida de la unidad, la cual es llevada hacia el múltiple de recirculación y saturada con gas mediante un eductor (B) que toma el gas de la sección de vapor (A), luego es inyectada a cada uno de los compartimientos del sistema para optimizar la operación. Las burbujas inducidas se rompen al salir de la boquilla (G) dispersándose en el volumen total para luego arrastrar las partículas de aceite

Figura 19. Celda de una Unidad de Flotación tipo Gas Disperso con Eductor Hidráulico

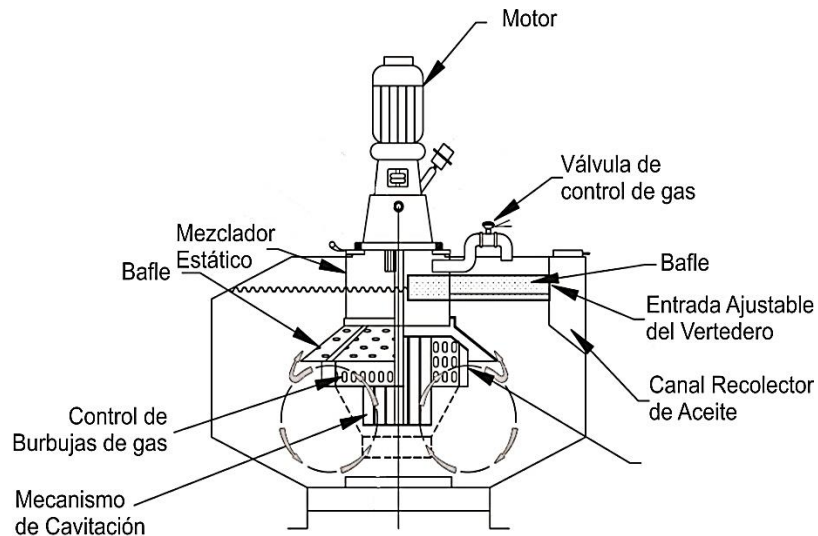


**Fuente:** Modificada Arnold, Ken y Stewart, Maurice. *Surface Production Operations. Design of Oil -Handling Systems and Facilities. Primera Edición. 1999.*

- Unidades de Flotación por Gas Disperso con Rotor Mecánico: En este tipo de unidades, el rotor mecánico hace que el agua fluya como se muestra en la **Figura 20**, las flechas se mueven generando remolinos y vacío dentro del flujo circular. Las cubiertas aseguran que el gas se disperse y sea arrastrado con el agua.

Las burbujas arrastran partículas de aceite hacia superficie, allí chocan con un baffle colocado en la tapa que conduce la espuma al colector para luego ser removida.

Figura 20. Sección Transversal de una Celda de una Unidad de Flotación Tipo Gas Disperso con Rotor Mecánico



**Fuente:** Modificada Arnold, Ken y Stewart, Maurice. *Surface Production Operations. Design of Oil -Handling Systems and Facilities. Primera Edición. 1999.*

- **Boquillas Eyectoras:** Los impulsores para producir microburbujas pueden ser remplazados por boquillas eyectoras, donde las burbujas son formadas en la garganta del eyector, el cual tiene un comportamiento similar a la de un venturi. Tecnologías de este tipo son aplicadas en sistemas para remoción de sólidos suspendidos e hidrocarburos y oxigenación de aguas residuales.
- **Difusores de Microburbujas:** La importancia de este sistema radica en la medida que el aire sea bien distribuido y en la selección adecuada del tipo de difusor (tamaño de la burbuja de aire) sobre el área a trabajar. Aplicaciones de estas tecnologías se encuentran en aireación de procesos biológicos, aireación de fangos, aireación y flotación de aguas residuales industriales.

- **Micro-Float:** Se basan en la generación de burbujas de aire producidas en la toma de aire atmosférico y posterior desposo de estas bajo la superficie del agua residual. Difiere de los otros modelos por su tamaño y versatilidad de uso (Ver **Figura 21**).

Figura 21. Esquema Micro-Float



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

Las unidades de Flotación con Aire Inducido llevan un proceso que implica poco reposo del agua residual, lo cual repercute en los bajos tiempos de retención del fluido gracias al uso de grandes cantidades de gas para el tratamiento. Los sistemas de flotación por aire disperso usualmente generan burbujas que son significativamente más grandes que aquellas generadas en sistemas por aire disuelto. Estas burbujas son también más grandes que la mayoría de las partículas o agregados a ser flotados, en estos sistemas generalmente las burbujas tienen diámetros entre 400 y 2000  $\mu\text{m}$ . Por consiguiente, la ventaja de una alta relación de diámetros partícula-burbuja se pierde, y las cinéticas de flotación deben ser mejoradas ya sea mediante el aumento de la frecuencia de colisión o de la hidrofobicidad de la superficie. La turbulencia inducida por el mecanismo generador de la burbuja puede proveer una muy alta frecuencia de colisión.

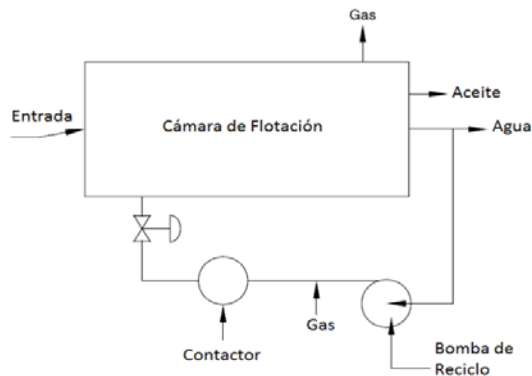
#### 2.2.2.4 Flotación con Aire Disuelto.

La flotación con aire disuelto es bien utilizada para la remoción de aceite libre, emulsionado y sólidos suspendidos en aguas residuales de la industria. En los procesos de flotación con aire disuelto (DAF), las pequeñas burbujas de gas son generadas por reducción en la presión de una corriente de agua residual, que ha sido expuesta a presiones más grandes que la atmosférica (2 - 4 atm). Cuando la presión se reduce y el líquido fluye a través de la válvula de reducción de presión en la cámara de flotación, pequeñas burbujas de aire son liberadas atrapando los sólidos suspendidos y el aceite, para llevarlas a la superficie donde son removidas.

Las unidades que conforman un sistema DAF son las siguientes:

- Bomba de presurización.
- Sistema de inyección del aire.
- Tanque de presurización (aire-agua).
- Válvula de alivio.
- Tanque de flotación.
- Sistema de remoción.

Figura 22. Diagrama esquemático del sistema DAF



**Fuente:** Modificada Arnold, Ken y Stewart, Maurice. *Surface Production Operations. Design of Oil -Handling Systems and Facilities. Primera Edición. 1999.*

Existen dos métodos para la generación de burbujas de aire en el proceso de DAF:

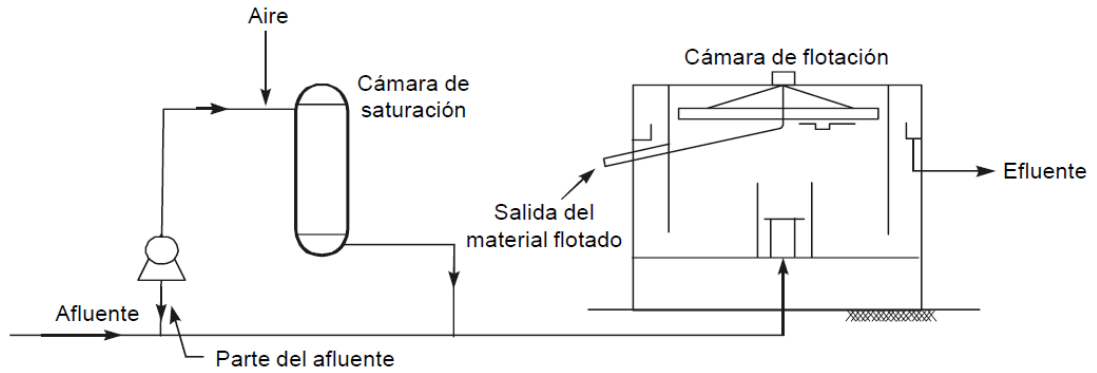
1. El aire es disuelto en el agua residual bajo una presión que puede variar desde 30 a 85 psig. La corriente presurizada a través de una válvula de alivio y es descargada cerca del fondo del tanque de flotación, donde la presión total es igual a la presión atmosférica más la cabeza hidrostática del líquido. Aquí, pequeñas burbujas de aire ascienden a la superficie llevando los contaminantes con ellas, para ser removidas por un desnatador (skimmer).
2. El agua residual se airea hasta que se satura con aire a presión atmosférica. Con la aplicación posterior de vacío se obtiene las burbujas, esta técnica ya no se utiliza en la industria de tratamiento de aguas residuales.

➤ Sistemas de presurización.

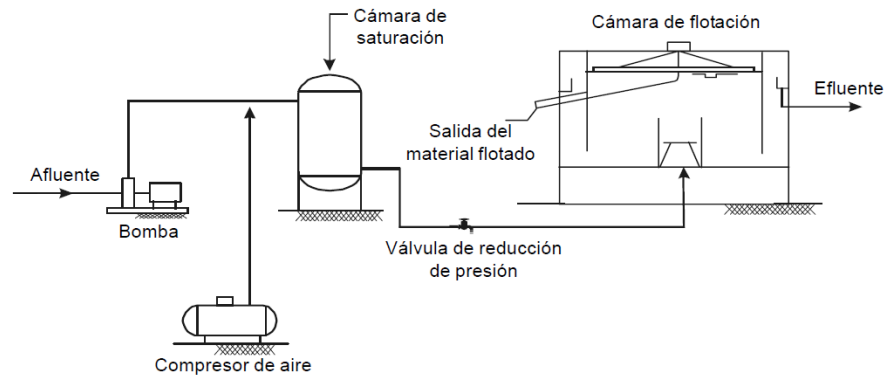
La mayoría de fabricantes han pasado de la presurización del flujo completo a la presurización de un flujo de reciclo para inducir la flotación, esto debido a que en la primera clase de presurización la presión está limitada a valores menores de 50 psig puesto que el volumen a tratar era bastante grande, además el proceso perdía eficiencia debido a la destrucción del flóculo a causa de la turbulencia y a las altas fuerzas de corte que se generaban en la corriente completa.

Existen tres formas de introducir el aire en los sistemas DAF. Estas formas son mostradas en la **Figura 23**.

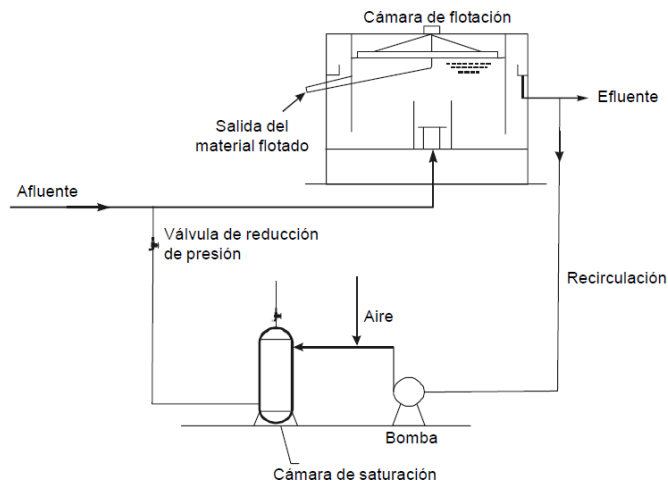
Figura 23. Diferentes procesos de presurización DAF



**Sistemas de flotación por aire disuelto. Presurización parcial del efluente**



**Sistemas de flotación por aire disuelto. Presurización total del efluente**



**Sistemas de flotación por aire disuelto. Presurización de la recirculación**

Fuente: VARGAS, Lidia de, *Flotación. Capítulo 8. Manual I.*

Tabla 11. Sistemas de presurización DAF

Flujo Total		Flujo Dividido		Recirculación	
Toda el agua residual entrante es presurizada con aire. Esto proporciona mayor cantidad de aire disuelto. Proporciona mayor contacto entre la burbuja de aire y la partícula a remover.		Parte del agua residual en el afluente es enviada al sistema de presurización mientras que la otra al flotador.		Entre el 20 y el 40 % del agua residual a trabajar es retornada al sistema de presurización.	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Máxima disolución de aire en el agua residual a cualquier presión.	El alto contenido de sólidos incrementa los costos de mantenimiento en bombas.	Reducción en los costos de bombeo. Gran flexibilidad del sistema para manejar variaciones de flujos.	Hay menos aire disuelto. Los sólidos en el afluente deben ser bobeados.	No requiere bombeo de sólidos en el afluente. Optimiza la formación de flocs.	Requiere celdas de flotación de gran tamaño.
Se requiere una cámara de flotación más pequeña.	El aceite en el afluente tiende a ser fácilmente emulsionado dificultando su separación.	Requiere sistemas de control más simples que los utilizados para un sistema de flujo total.	Puede emulsionar el aceite con el agua de la carga.	No existe emulsión de aceite en el agua de carga.	
Existe un mayor número de burbujas de gas aumentando el contacto con los sólidos a remover.	Altos requerimientos de energía.	Cuando se usan coagulantes la corriente que no es presurizada con aire debe actuar como una cámara de floculación. Reducción en el rompimiento de los flocs.	Puede emulsionar el aceite con el agua de la carga.	El sistema requiere controles de bobeo sencillos para flujos variables.	

Fuente: Modificada WANG Lawrence, et al., *Handbook of Environmental Engineering - Flotation Technology*. Volumen 12. Londres, Inglaterra Año 2010.

#### 2.2.2.5 Diferencias entre los sistemas DAF - IAF

La diferencia fundamental entre el proceso IAF y DAF, radica en el mecanismo de generación e inyección de burbujas.

1. En los sistemas DAF, primero el aire es disuelto bajo presión para luego dar origen a la formación de microburbujas de aire al disminuir la presión. En los sistemas IAF, grandes impulsores con alta velocidad producen grandes cantidades de aire dentro de la suspensión, produciendo burbujas de aproximadamente 1000  $\mu\text{m}$  de diámetro.
2. La cinética de flotación por aire inducido (IAF) es muy rápida, originando tiempos de retención muy pequeños. Esto conlleva a trabajar con sistemas de flotación de menor tamaño.
3. Lo importante al utilizar los sistemas IAF es la inyección y distribución de las burbujas sobre el agua residual a tratar, mientras en los sistemas DAF lo importante es la concentración del aire en el agua y posterior despojo de las burbujas.
4. En los sistemas IAF el aire entra en forma de burbujas con ausencia de bombas de aire y bombas de recirculación. Mientras en los sistemas DAF existe la necesidad de la disolución del aire en el agua, los cuales crean la necesidad de bombas de recirculación y de compresores de aire.
5. En DAF, se añaden productos químicos para flocular el aceite y los sólidos suspendidos para que las burbujas se puedan unir y/o quedar atrapadas en el flóculo. En flotación por aire inducido, se añaden productos químicos para hacer que el aceite y los sólidos suspendidos se sumerja con la burbuja de aire y así flotar a la superficie.
6. En los sistemas de DAF, normalmente se añaden productos químicos y se mezclan con el agua residual en un recipiente que precede al equipo de DAF. En los sistemas de la IAF, los productos químicos se ponen en el agua residual justo antes de la primera celda de flotación, con las condiciones de turbulencia en esta celda que proporciona la energía necesaria para la mezcla.

### 2.3 DESARROLLOS ACTUALES Y FUTUROS<sup>37</sup>

La generación de microburbujas para tratamientos de aguas residuales es un tema muy importante, pero tal vez, aplicaciones futuras vean el desarrollo en tamaños de burbuja más pequeños.

Por otro lado, muchos autores cuestionan el alto consumo de energía por el tipo de sistema, pero que en lo general se tolera debido a la alta eficiencia en el tratamiento de aguas residuales. Los enfoques futuros vienen desarrollándose en reducir progresivamente el consumo de energía y así mismo mejorar el diseño del sistema. El principal desafío de pasar a metodologías de bajo consumo, es el no sacrificio del tamaño y distribución de las microburbujas.

A continuación se describen y detallan nuevas técnicas de separación de partículas contaminantes de efluentes líquidos y se presentan equipos innovadores de flotación.

#### 2.3.1 Técnicas en Desarrollo<sup>38</sup>.

##### 2.3.1.1 . Flotación de partículas adsorbentes.

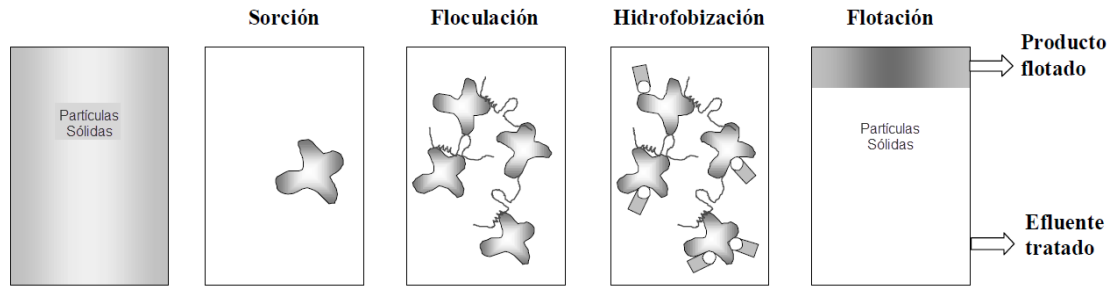
La base de este proceso es la selección de un material adsorbente adecuado, o sea, con elevada área superficial y alta reactividad con el elemento contaminante (alta capacidad de adsorción). El mecanismo responsable por el proceso FPA (“Adsorbing particulate flotation”) es compuesto de 4 etapas en nivel macroscópico y 11 en nivel microscópico (ver **Figura 24**).

---

<sup>37</sup> ZIMMERMAN, William, *et al*, Microbubble Generation. Department of Chemical and Process Engineering, University of Sheffield. Reino Unido. Institute of Thermomechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic,

<sup>38</sup> **Fuente:** DA ROSA, J. *et al*. Flotación como Proceso de Remoción de Contaminantes. III. Nuevas Técnicas y Equipos. Depto. Ingeniería de Minas, Universidad Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

Figura 24. Proceso de flotación de partículas adsorbentes -FPA



**Fuente:** DA ROSA, J. et al. *Flotación como Proceso de Remoción de Contaminantes. III. Nuevas Técnicas y Equipos.* Depto. Ingeniería de Minas, Universidad Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

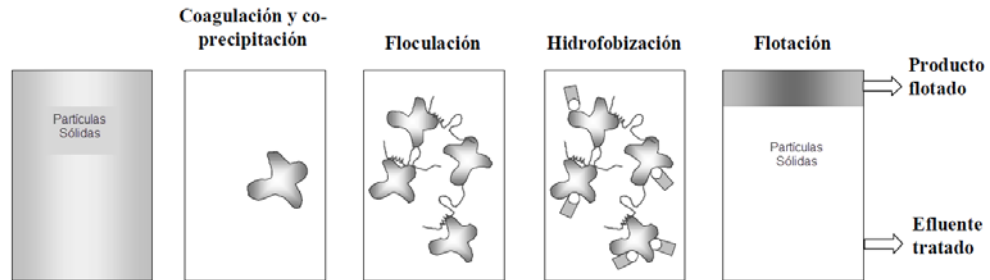
Las etapas macroscópicas son: adsorción/absorción de los iones en la superficie del sólido sorvente; floculación/agregación de las partículas sólidas conteniendo los iones; colisión y adhesión burbuja/agregados de partículas; flotación.

Las etapas microscópicas, incluyendo los fenómenos de transporte de masa por difusión y los fenómenos interfaciales pueden ser divididas en: difusión del ion pela solución; difusión a través de la película de líquido que envuelve la partícula; migración del ión hacia la superficie de la partícula; difusión a través de los poros; adsorción en un sitio activo, intercambio iónico y/o absorción; agregación/floculación de las partículas; hidrofobización de los agregados; interacción con burbujas; flotación propiamente dicha.

### 2.3.1.2 Flotación de Agregados Coloidales (FAC)

La base de este proceso es la formación de agregados a partir de la adsorción/coprecipitación de los iones contaminantes en colóides con alta área superficial, baja toxicidad y buenas características de flotación, especialmente con el empleo de microburbujas generadas *in situ*, como en el caso de la FAD (ver figura 2). La cinética de levitación de las unidades burbujas – partículas puede ser incrementada con la adición de polímeros o hidrofobizantes (colectores).

Figura 25. Proceso de Flotación de Agregados Coloidales (FAC)



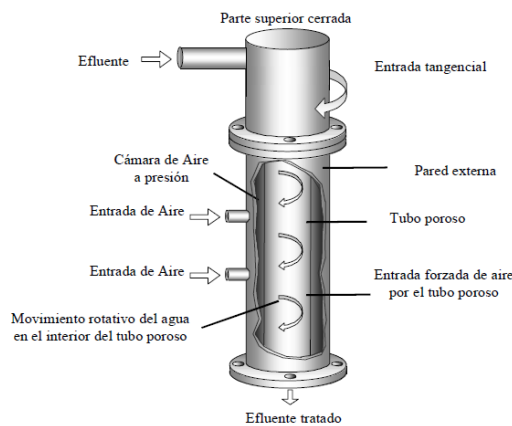
**Fuente:** DA ROSA, J. et al. *Flotación como Proceso de Remoción de Contaminantes. III. Nuevas Técnicas y Equipos.* Depto. Ingeniería de Minas, Universidad Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

### 2.3.2 Nuevos sistemas de flotación.

#### 2.3.2.1 Cilindro aireado o cámara de burbujas, BC, o “bubble chamber”.

Este sistema es una variante del Hidrociclón de Miller-ASH sin el “overflow” y sirviendo de “contactor” de burbujas y partículas. El ASH y el BC hacen parte de un conjunto de sistemas de flotación centrífuga de alta capacidad que aplica el concepto de separación con burbujas pequeñas en un campo centrífugo.

Figura 26. Cilindro aireado o cámara de burbujas, BS, o “bubble chamber”



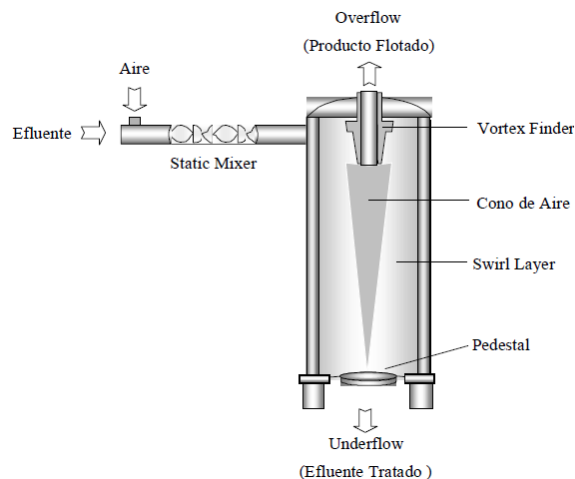
**Fuente:** DA ROSA, J. et al. *Flotación como Proceso de Remoción de Contaminantes. III. Nuevas Técnicas y Equipos.* Depto. Ingeniería de Minas, Universidad Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

Estos sistemas han sido recientemente utilizado en el área ambiental, en la remoción de tintas de papel (reciclo) y aceites. El sistema BC consta de un contactor y un separador de las fases flotantes y agua tratada.

### 2.3.2.2 Separador centrífugo

Un sistema diferente fue desarrollado en el laboratorio de la Universidad do Rio Grande do Sul y emplea el mismo principio de la nozzle flotation, con la diferencia de que después de la etapa de pasaje forzada por la válvula (en este caso el flujo es horizontal), la solución aireada pasa por un "static mixer" y todo el conjunto alimenta a un separador de forma cilíndrica que posee entrada tangencial, un pedestal para formar el "air core", "underflow", "vortex finder" y "overflow". Las principales variables de diseño son las dimensiones del cilindro y sus distintas partes, el tipo de contactor ("static mixer") y el sistema de auto aspiración. Entre los parámetros operacionales, se destacan, la presión del fluido dentro del separador centrífugo, la localización del pedestal y el caudal a ser tratado.

Figura 27. Celda de Flotación Centrífuga del LTM

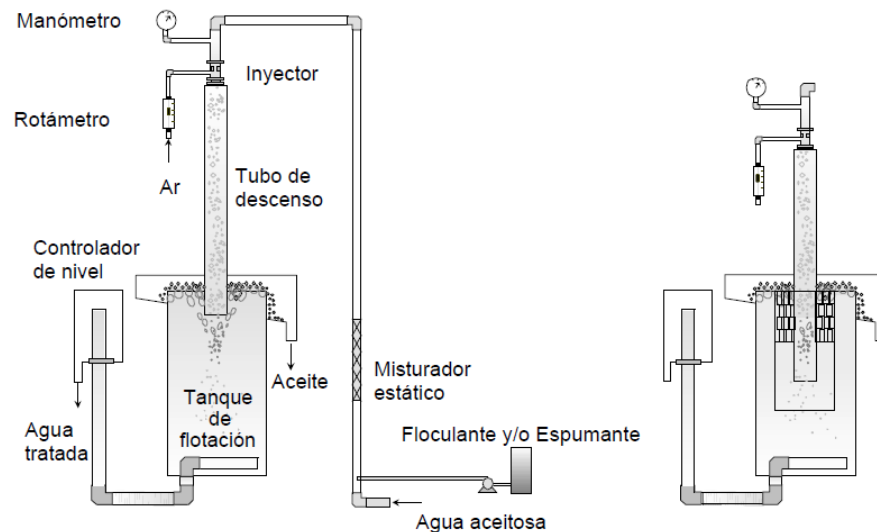


**Fuente:** DA ROSA, J. et al. *Flotación como Proceso de Remoción de Contaminantes. III. Nuevas Técnicas y Equipos.* Depto. Ingeniería de Minas, Universidad Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

### 2.3.2.3 Flotación Jet-Jameson Modificada

Las celdas de flotación jet convencionales, CFJC, consisten de un tubo de contacto, un tanque de flotación y un controlador de nivel. El tubo de contacto está a su vez formado por un inyector (generador de burbujas) localizado en la parte superior que permite introducir la corriente a tratar en forma de jet, un tubo de descenso ("downcomer"), y en la parte inferior, posee un distribuidor de burbujas o difusor (Ver **Figura 18**). En estas celdas el proceso de "colección" (colisión - adhesión) y la formación de los agregados gotas de aceite - burbujas de aire, se produce en el tubo de descenso ("downcomer") y la separación de estos agregados del agua, en el tanque de flotación (separación de las fases). La mezcla cae en co-corriente, siendo descargada en el tanque de separación de las fases, donde los agregados ascienden a la superficie (camada de espuma), mientras que el agua tratada es descargada por la parte inferior.

Figura 28. Celda de Flotación Jet Convencional, CFJC, y (b) Modificada, CFJM



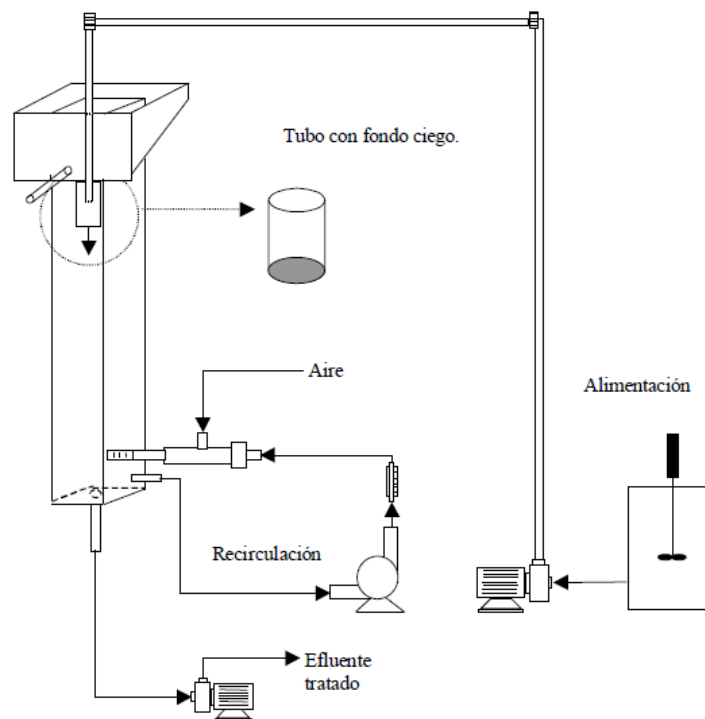
**Fuente:** DA ROSA, J. et al. *Flotación como Proceso de Remoción de Contaminantes. III. Nuevas Técnicas y Equipos.* Depto. Ingeniería de Minas, Universidad Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

#### 2.3.2.4 Flotación Columnar

Las ventajas de este diseño con respecto a las celdas convencionales son menor costo de instalación y operación, menor ocupación de espacio, disminución sustancial del consumo de energía, principalmente porque no tiene sistema de agitación mecánica, fácil automatización y control por computadora y menor consumo de reactivos que las celdas de agitación mecánica.

La celda columnar tipo Microcel fue modificada de tal manera que la alimentación entra junto con la fase espuma para optimizar la separación sólido - líquido (Ver **Figura 29**). En el reciclo, realizado por bombeo, a través de un venturi o válvula de aguja, el aire es succionado en el tubo interior donde se forman las burbujas, moduladas en su tamaño con la adición de tensoactivos.

Figura 29. Columna de flotación – LTM-UFRGS



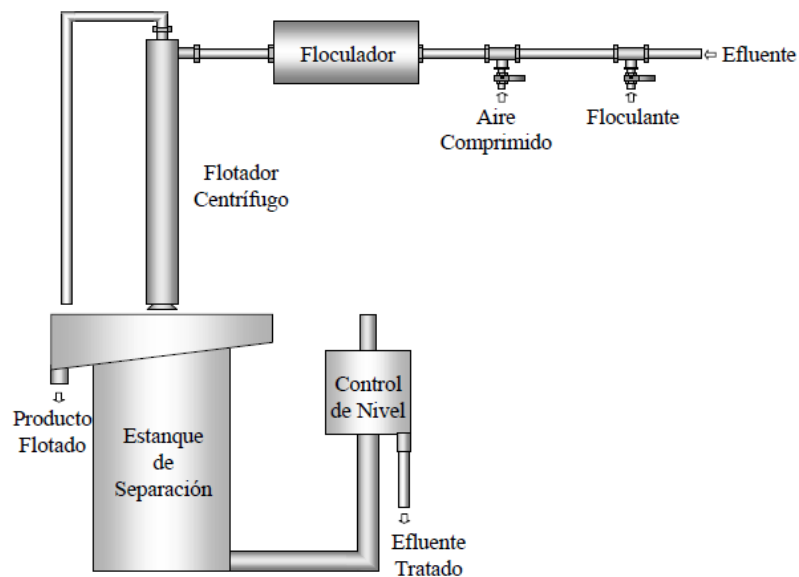
**Fuente:** DA ROSA, J. et al. *Flotación como Proceso de Remoción de Contaminantes. III. Nuevas Técnicas y Equipos.* Depto. Ingeniería de Minas, Universidad Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

### 2.3.2.5 Celda FF: Floculación – Flotación

Un nuevo sistema de floculación, ha sido desarrollado en nuestro laboratorio, acoplado a un sistema de flotación centrífuga (Ver **Figura 30**). La floculación o coalescencia de emulsiones aceite en agua, ocurre en la presencia de aire y en un floculador especialmente diseñado para aumentar la turbulencia.

El tiempo de residencia es del orden de segundos lo que hace de FF un equipo de alta capacidad. Este flotador compacto ha sido utilizado en la remoción de aceites y grasas, para el tratamiento y reciclo de aguas de lavado de vehículos y en la remoción de sólidos suspendidos

Figura 30. Sistema FF-Floculación-flotación



**Fuente:** DA ROSA, J. et al. *Flotación como Proceso de Remoción de Contaminantes. III. Nuevas Técnicas y Equipos.* Depto. Ingeniería de Minas, Universidad Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

### 3 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

La importancia de realizar una adecuada selección del proceso de tratamiento de aguas de producción de un campo petrolero, radica en los grandes cambios que ha sufrido la reglamentación nacional en el área ambiental, determinando así, que la ejecución de obras y actividades de la industria del petróleo debía contar con una planificación ambiental adecuada para aquellas actividades susceptibles de causar deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente.

Así mismo la Norma ISO 9001, por la cual se rige la industria petrolera en términos de calidad y contratación, estipula que para que una empresa pueda realizar una compra se requiere determinar con rigor los requisitos del producto a comprar, se debe seleccionar proveedores en función de su capacidad para proporcionar el producto deseado, que los productos comprados cumplan los requisitos solicitados y llevarse a cabo evaluación continua de los proveedores del producto.

Estas normas se cumplen de forma voluntaria ya que la ISO, siendo una entidad no gubernamental, no cuenta con la autoridad para exigir su cumplimiento. Sin embargo, tal como ha ocurrido con los sistemas de administración de calidad adaptados a la norma ISO 9000, estas normas pueden convertirse en un requisito para que una empresa se mantenga en una posición competitiva dentro del mercado

Es por ello que surge la necesidad de determinar el tipo de estrategia para la selección de posibles alternativas de tratamiento disponibles en el mercado, las cuales ayuden a suplir los requerimientos ambientales establecidos por la normativa Colombiana.

Definiendo el problema de fondo, y asumiendo como objeto de este proyecto, es válido determinar por posible solución las tecnologías basadas en el sistema de microburbujas, a las cuales, en el siguiente capítulo se le desarrolla una evaluación técnica.

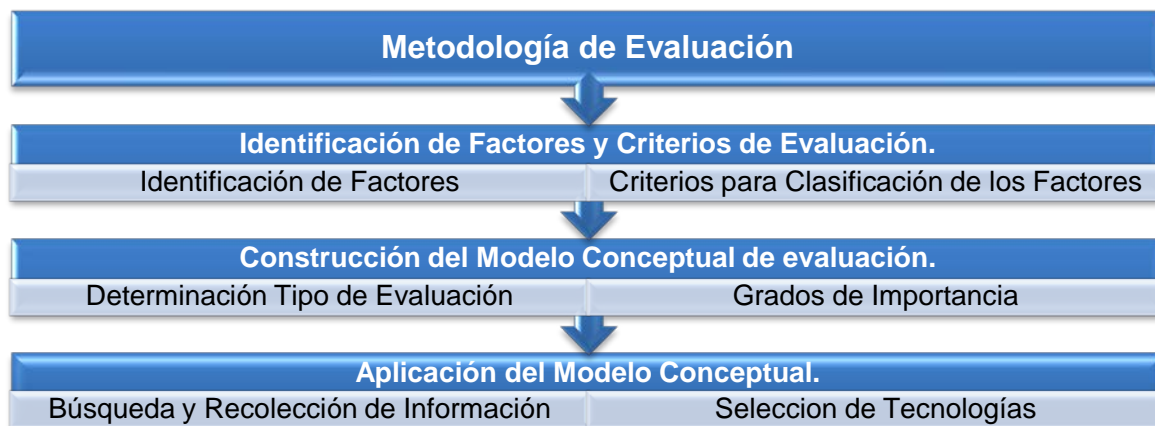
Cierta evaluación incluye la adaptación de metodologías<sup>39</sup> usadas en sistemas de diferentes industrias, y ha sido ajustada de manera conceptual e ideada como una herramienta para recomendar una acción o elección dentro de las opciones tecnológicas disponibles, donde las diferentes alternativas se pueden evaluar en términos de muchos criterios específicos al sistema escogido, arrojando resultados que dependen de la cantidad y calidad de la información con la que se cuenta.

A continuación se presenta el proceso llevado a cabo en la metodología propuesta para la evaluación.

### 3.1 ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA

En la **Figura 31** se muestran los pasos a seguir para la evaluación y comparación de las tecnologías basadas en el sistema de microburbujas.

Figura 31. Esquema metodología de evaluación y comparación de tecnologías



**Fuente:** Los autores.

<sup>39</sup> VELILLA, Wilmer, *et al.* Metodología de diseño conceptual para la selección de un sistema manipulador de tambores para camiones de carga. Universidad Autónoma del Caribe. Bogotá. Año 2010.  
 MONTAÑA Faber .Selección de Tecnología para la Recolección y Transporte de Aguas Lluvias y Aguas Residuales en Áreas Urbanas. Universidad del Valle, Santiago de Cali. Año 2010.

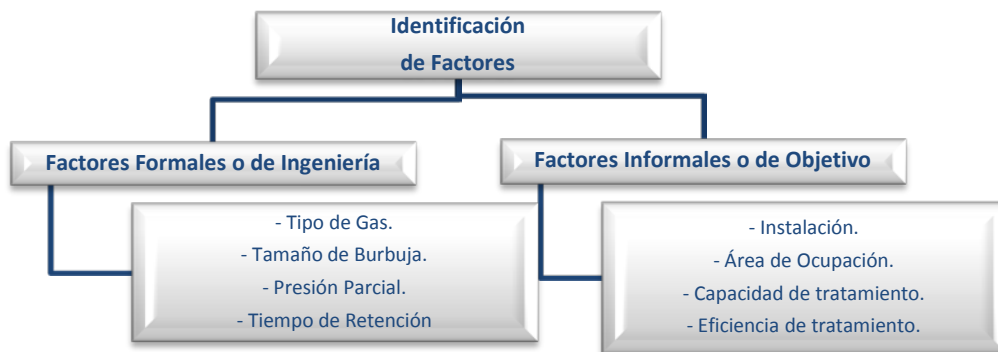
### 3.2 IDENTIFICACIÓN DE FACTORES Y CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Los factores y criterios de evaluación se identifican en dos pasos. El primero de ellos consiste en la revisión del estado del arte de tecnologías basadas en sistemas de microburbujas, donde se puede encontrar la oferta tecnológica disponible e identificar características propias del sistema, principios, ventajas y desventajas. Estos son analizados conceptualmente y de manera general en el **Capítulo 2** del presente proyecto. El segundo paso consiste en la categorización y construcción de una tabla en donde los factores identificados se clasifican en tres grupos de criterios generales.

#### 3.2.1 Identificación de Factores.

Se identifican dos tipos de factores involucrados. Formales o de ingeniería del sistema, e informales o de objetivo<sup>40</sup>. Los primeros describen los requerimientos funcionales para el sistema, los últimos son los requerimientos identificados como logísticos.

Figura 32. Esquema identificación de criterios



**Fuente:** Los autores.

---

<sup>40</sup> VELILLA, Wilmer, *et al.* Metodología de diseño conceptual para la selección de un sistema manipulador de tambores para camiones de carga. Universidad Autónoma del Caribe. Bogotá. Año 2010.

### 3.2.2 Criterios para Clasificación de Factores .

Los factores enunciados anteriormente se clasifican y se jerarquizan en tres grupos de criterios generales, los cuales son: diseño, logística y medio ambiente. De acuerdo al grado de importancia y relevancia basado en la definición del problema presentado, los factores se ordenan de mayor a menor.

Tabla 12. Clasificación de factores en los grupos de criterios

Diseño	Logística	Medio Ambiente
Tamaño de Burbuja Presión de Entrada Tiempo de Retención Tipo de Gas	Capacidad de Tratamiento Área de Ocupación Instalación	Eficiencia de Tratamiento

*Fuente:* Los autores.

## 3.3 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DE EVALUACIÓN

En el modelo conceptual se determina el tipo y forma de evaluación y jerarquización de los factores y criterios identificados.

### 3.3.1 Determinación Tipo de Evaluación.

Para evaluar las tecnologías escogidas, se determinó que el método a usar es el Modelo de Suma Ponderada (Weighted Sum Model – **WSM**). Este es un método de evaluación multicriterio, que le da el mayor valor a la mejor alternativa entre diversas opciones, con base en un puntaje que representa el rendimiento global de la tecnología. Este puntaje se conoce como puntaje de suma ponderada y se calcula con la siguiente ecuación:

Ecuación 12. 
$$P_{iWSM} = \sum_{j=1}^n a_{ij}w_j$$

Donde  $P_{iWSM}$  es el puntaje de suma ponderada de la alternativa  $i$ ,  $n$  es el número de factores de decisión,  $W_j$  es el rendimiento de la alternativa  $j$  y  $\alpha_{ij}$  es el peso de cada factor  $i$  en términos del factor de evaluación  $j$ .

El peso de cada factor ( $\alpha_{ij}$ ) representa su importancia relativa dentro de la evaluación  $i$  es evaluada respecto al factor  $j$  y el rendimiento de la alternativa ( $W_j$ ), que corresponde a un puntaje de calificación asignado cuando la alternativa  $j$ . Al finalizar los cálculos, se selecciona la alternativa con el mayor puntaje  $P_{iWSM}$  como la mejor opción.

El uso del **WSM** se justifica por tres razones. Primero, la evaluación de las tecnologías se realiza considerando simultáneamente múltiples criterios que representan diferentes dimensiones. Segundo, categorizar las alternativas es directo y simple. Tercero, los criterios pueden ser ponderados para reflejar su importancia relativa dentro de un contexto particular.

### 3.3.1.1 Determinación de pesos ponderados de cada factor ( $\alpha_{ij}$ ).

Para determinar el peso de cada factor ( $\alpha_{ij}$ ), se utiliza la relación de importancia que estos mantienen entre sí, utilizando el método de Jerarquización Analítica<sup>41</sup>. Se asigna un valor numérico que representa la importancia del factor a evaluar respecto a otro. En la **Tabla 13** se presenta la Jerarquización de los criterios generales (diseño, logística y medio ambiente).

Tabla 13. Relación de importancia entre áreas de clasificación

Factores	Diseño	Medio Ambiente	Logística	Total (Fila)	Peso
Diseño	1,00	5,00	5,00	11,00	0,66
Medio Ambiente	0,20	1,00	3,00	4,20	0,25
Logística	0,20	0,33	1,00	1,53	0,09
<b>Total</b>				16,73	1,00

**Nota:** Los valores de las calificación son los siguientes: 1-Igual importancia, 3-Importancia moderada, 5- importancia fuerte<sup>3</sup>.

**Fuente:** Los autores.

<sup>41</sup> SÁNCHEZ, Gabriel. *Técnicas Participativas para la Planeación. Capítulo 16. Jerarquización Analítica.*

Posteriormente se establece la comparación entre los factores específicos de cada grupo de criterios (ver **Tabla 14** y **Tabla 15**), eximiendo de este paso al criterio Medio Ambiente, ya que cuenta con un solo factor de evaluación, el cual toma su porcentaje absoluto (25%).

Tabla 14. Relación de importancia entre factores de diseño

Factores	Tamaño de Burbuja	Presión Parcial	Velocidad de Elevación	Tiempo de Retención	Suministro y Solubilidad del Gas	Relación Sólidos/Aire	Total (Fila)	Peso Relativo	Peso Absoluto*
Tamaño de Burbuja	1,00	4,00	4,00	4,00	5,00	5,00	23,00	0,46	0,304
Presión de Entrada	0,25	1,00	3,00	3,00	4,00	4,00	15,25	0,31	0,202
Tiempo de Retención	0,25	0,33	1,00	1,00	3,00	3,00	8,58	0,17	0,113
Tipo de Gas	0,20	0,25	0,33	0,33	1,00	1,00	3,12	0,06	0,041
<b>Total</b>							49,95	1,00	0,660

\* Peso absoluto a 66% correspondiente al factor Diseño.  
Fuente: Los autores.

Tabla 15. Relación de importancia entre factores de logística

Factores	Capacidad de Tratamiento	Área de Ocupación	Instalación	Total (Fila)	Peso Relativo	Peso Absoluto**
Capacidad de Tratamiento	1,00	3,00	3,00	7,00	0,6	0,054
Área de Ocupación	0,33	1,00	1,00	2,33	0,2	0,018
Instalación	0,33	1,00	1,00	2,33	0,2	0,018
<b>Total</b>				11,76	1,0	0,090

\*\* Peso absoluto a 9% correspondiente al factor Logística.  
Fuente: Los autores.

### 3.3.1.2 Rendimiento del Factor $W_j$ - Escala para la evaluación apreciativa.

El rendimiento del factor ( $W_j$ ) se fija por medio de un valor apreciativo de uno (1) a diez (10). Como los factores que se establecieron son cualitativos, o no están expresados directamente en una escala numérica única, previamente se debe establecer la escala a usar para cada uno de ellos (Ver **Tabla 16**)

Tabla 16. Valores del criterio de evaluación apreciativa

Clasificación	Escala de Evaluación Apreciativa
Excelente	9,1 – 1,0
Muy Superior	8,1 – 9,0
Superior	7,1 – 8,0
Muy Buena	6,1 – 7,0
Buena	5,1 – 6,0
Regular	4,1 – 5,0
Menos que Regular	2,9 – 4,0
Mala	1,5 – 2,8
Muy Mala	0,1 – 1,4

*Fuente:* Modificada HERNÁNDEZ, José y GARCÍA, María. *Matrices De Ponderación para la evaluación de proveedores.* Universidad Metropolitana, Departamento de Gestión Tecnológica., Venezuela. Año 2007.

Este método depende en gran medida de los conocimientos previos y apreciación del evaluador, además de la calidad de la información recopilada para llevar a cabo la evaluación.

### 3.3.2 Grados de Importancia.

A continuación, en la **Tabla 17** se presenta un listado detallado de los factores a evaluar con su grado de importancia, para apreciar el grado de cumplimiento en cuanto a necesidades significativas.

Tabla 17. Pesos Ponderados

No.	Factores	Grado de Importancia
1	Tamaño de Burbuja	30,4%
2	Eficiencia de Tratamiento	25,0%
3	Presión de Entrada	20,2%
4	Tiempo de Retención	11,3%
5	Capacidad de Tratamiento	5,4%
6	Tipo de Gas	4,1%
7	Área de Ocupación	1,8%
8	Instalación	1,8%

*Fuente:* Los autores.

### 3.4 APLICACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL.

Teniendo en cuenta el ámbito de aplicación de la metodología y la disponibilidad de información, se seleccionan las tecnologías a evaluar.

#### 3.4.1 Búsqueda y Recolección de Información.

Para esta etapa se realiza la búsqueda y recolección de información sobre tecnologías basadas en el sistema de microburbujas. Principalmente se consultan fuentes secundarias tales como patentes, artículos científicos y empresas del sector especializadas en tratamientos de agua de producción. Una vez definidas las tecnologías, se realiza un análisis y clasificación de la información de interés.

#### 3.4.2 Selección de Tecnologías.

De acuerdo a los factores y criterios identificados, se escogen las tecnologías que cuenten con la mayor cantidad de datos para proceder a realizar la evaluación y comparación.

## 4 APLICACIÓN DE MODELO CONCEPTUAL

### 4.1 SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS.

Para aplicar la metodología se realizó la búsqueda y recolección de información sobre tecnologías recientes basadas en el sistema de microburbujas.

A partir de la etapa de Identificación de Factores y Criterios de Evaluación, en donde se determinaron los diferentes ítems a evaluar por considerarse relevantes. Se analizaron diferentes tecnologías, en las cuales se identificó y clasificó información referente a tamaños de burbuja generados, eficiencia de remoción de sólidos suspendidos y gotas de aceite, tipo de gas utilizado, entre otros.

Depurada la información, se seleccionaron ocho (8) tecnologías las cuales contaban con todos los datos necesarios para llevar a cabo la evaluación, además de aportar información significativa para la investigación.

#### 4.1.1 Alternativas de Evaluación.

A continuación se presentan las alternativas para la evaluación y comparación, de las cuales será seleccionada la que en mayor grado cumpla las funciones requeridas.

##### 4.1.1.1 Sistema de remoción de hidrocarburos en agua de proceso de alta especificación.

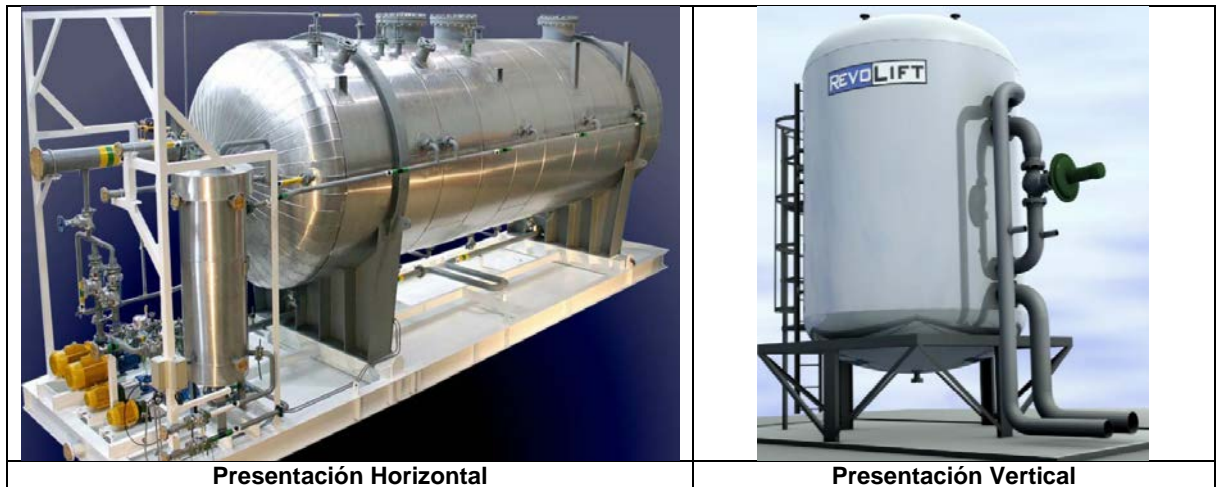
El sistema es completamente hidráulico y no contiene partes internas móviles. De esta manera, la separación se realiza constantemente y sin problemas. El diseño multicámara y secuencial maneja perturbaciones y flujos variables sin reducción del rendimiento ni problemas de cortocircuito.

Tabla 18. Ficha de información alternativa 1

<b>Nombre Original</b>	Revolift HS Flotation <sup>42</sup>
<b>Apoderado</b>	Exterran Water Solutions
<b>Tipo de sistema</b>	Flotación por gas inducido.

Fuente: Los autores.

Figura 33. Esquema alternativa 1 - Revolift HS Flotation



Fuente: Exterran Holdings Water Solutions. Revolift HS Flotation. Estados Unidos. www.exterran.com. Año 2012.

Tabla 19. Características técnicas alternativa 1

No. ítem	Variable	Valor
1	Tamaño de Burbuja	30-50 $\mu\text{m}$
2	Eficiencia de Tratamiento	85 – 90 %
3	Presión de Entrada	Sistema Hidráulico
4	Tiempo de Retención	5 min
5	Capacidad de Tratamiento	Amplio rango para manejar flujos variables sin perder rendimiento. Flexibilidad: 10.000 – 100.000 BWPD. El diseño multicámara y secuencial maneja perturbaciones y flujos variables sin reducción del rendimiento ni problemas de cortocircuito.
6	Tipo de Gas	Casi cualquier gas es aceptable para la generación de microburbujas.
7	Área de ocupación	Depende de la capacidad de tratamiento que se requiera. Posibilidad de arreglo vertical.
8	Instalación	Típica instalación de facilidad fija.

Fuente: Los autores.

<sup>42</sup> Exterran Holdings Water Solutions. Revolift HS Flotation. Estados Unidos. www.exterran.com. Año 2012.

#### 4.1.1.2 Remoción de petróleo/aceite en agua de proceso (efluentes secundarios).

Es un sistema compacto de flotación por Gas Inducido. Iguala el desempeño de los sistemas de altas especificaciones por una fracción de los costos y se encuentra disponible con capacidad para caudales estándar y bajos. Es ideal para aplicaciones mejoradas de disposición de aguas y recuperación de aceites o para operaciones iniciales con múltiples factores desconocidos.

Tabla 20. Ficha de información alternativa 2

<b>Nombre</b>	Revolift VS Flotation <sup>43</sup>
<b>Apoderado</b>	Exterran Water Solutions
<b>Tipo de sistema</b>	Flotación por gas inducido.

Fuente: Los autores

Figura 34. Esquema alternativa 2 - Revolift VS Flotation



Fuente: Exterran Holdings Water Solutions. Revolift VS Flotation. Estados Unidos. [www.exterran.com](http://www.exterran.com). Año 2013.

---

<sup>43</sup> Exterran Holdings Water Solutions. Revolift VS Flotation. Estados Unidos. [www.exterran.com](http://www.exterran.com). Año 2013.

Tabla 21. Características técnicas alternativa 2

No. Ítem	Variable	Valor
1	Tamaño de Burbuja	30 – 50 µm
2	Eficiencia de Tratamiento	90 %
3	Presión de Entrada	Sistema Hidráulico
4	Tiempo de Retención	8 min
5	Capacidad de Tratamiento	Disponible con capacidad para caudales estándar y bajos. 0 – 27.500 BWPD. Existen configuraciones especiales de hasta 150.000 BWPD. Capaz de manejar flujos variables sin reducción en el desempeño.
6	Tipo de Gas	Casi cualquier gas es aceptable para la generación de microburbujas.
7	Área de ocupación	Ahorro de espacio. Diseño compacto, autocontenido
8	Instalación	La unidad no requiere incurrir en gastos de construcción de cimientos; una vez que queda nivelada y conectada, está lista para operar. Fácil de enviar .Logística para simplificar instalación/reinstalación, lo que reduce los costos de capital. Costos de conexión sustancialmente menores comparado con sistemas de altas especificaciones.

Fuente: Los autores.

#### 4.1.1.3 Remoción Secundaria de petróleo del Agua de Producción.

El sistema de Flotación GFT permite la separación de grandes volúmenes de agua con contenido de petróleo gracias a su diseño flexible, eficiente y económico. El sistema GFT logra estos resultados al mismo tiempo que reduce los tiempos de retención a una hora en lugar de las 4-6 horas necesarias en los tanques desnatadores tradicionales API. El sistema también se puede colocar de modo de aprovechar la instalación de tanques existentes y así mantener los costos en el nivel mínimo.

Tabla 22. Ficha de información alternativa 3

<b>Nombre</b>	Flotación GFT <sup>44</sup>
<b>Apoderado</b>	Exterran Water Solutions
<b>Tipo de sistema</b>	Flotación por gas inducido.

Fuente: Los autores

<sup>44</sup> Exterran Holdings Water Solutions. Flotación GFT. Estados Unidos. www.exterran.com. Año 2013.

Figura 35. Esquema alternativa 3 - Flotación GFT



Fuente: Exterran Holdings Water Solutions. Flotación GFT. Estados Unidos. www.exterran.com. Año 2013.

Tabla 23. Características técnicas alternativa 3

No. ítem	Variable	Valor
1	Tamaño de Burbuja	30 – 50 $\mu\text{m}$
2	Eficiencia de Tratamiento	95%
3	Presión de Entrada	Sistema Hidráulico
4	Tiempo de Retención	60 min
5	Capacidad de Tratamiento	Gran rango de operación que permite trabajar prácticamente a cualquier flujo: 10.000 - 500.000 BWPD Permite incrementar gradualmente la producción. El diseño multicámara brinda un margen de amortiguación excelente para poder adaptarse a variaciones de flujo y de concentración de hidrocarburos.
6	Tipo de Gas	Casi cualquier gas es aceptable para la generación de microburbujas.
7	Área de ocupación	Compacto, ahorra espacio y costos asociados con la ingeniería e instalación de trenes múltiples.
8	Instalación	Menores costos de instalación gracias a que hay menos equipos y las conexiones son más simples.

Fuente: Los autores.

#### 4.1.1.4 Unidad DAF con tecnología Nikuni

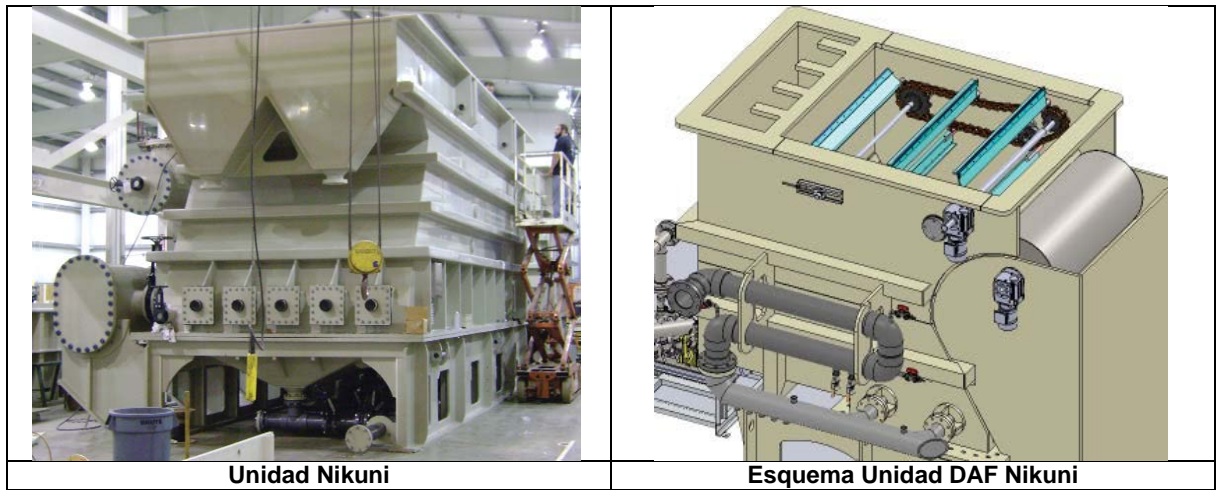
La bomba Nikuni genera en las corrientes de agua aire disuelto altamente saturado de manera eficiente y confiable. El diseño innovador utiliza tres tipos de fuerzas para generar alta presión en un solo ciclo: una fuerza de fricción empuja el líquido en la dirección de rotación, una fuerza centrífuga hace pivotar el líquido en la dirección transversal de rotación y una fuerza axial empuja el líquido a ambos lados del impulsor; lo que en conjunto ofrece la acción disolvente del aire y la presión deseada.

Tabla 24. Ficha de información alternativa 4

<b>Nombre</b>	Nikuni Technology <sup>45</sup>
<b>Apoderado</b>	World Water Works
<b>Tipo de sistema</b>	Flotación por gas disuelto

Fuente: Los autores

Figura 36. Esquema alternativa 4 - Flotación GFT



Fuente: World Water Works. Nikuni Technology. Estados Unidos. www.worldwaterworks.com. Año 2012.

Tabla 25. Características técnicas alternativa 4

No. Ítem	Variable	Valor
1	Tamaño de Burbuja	10-30 $\mu\text{m}$
2	Eficiencia de Tratamiento	98 %
3	Presión de Entrada	58 - 87 psi
4	Tiempo de Retención	5 – 10 min
5	Capacidad de Tratamiento	170 - 250.000 BWPD
6	Tipo de Gas	Aire. La bomba no requiere sistema compresión de aire.
7	Área de ocupación	Depende de la capacidad de tratamiento que se requiera.
8	Instalación	Instalación en pocos días con bajos costos de obras civiles.

Fuente: Los autores.

<sup>45</sup> World Water Works. Nikuni Technology. Estados Unidos. www.worldwaterworks.com. Año 2012.

#### 4.1.1.5 Sistema de flotación con aire disuelto con mejora en el sistema de inyección de agua.

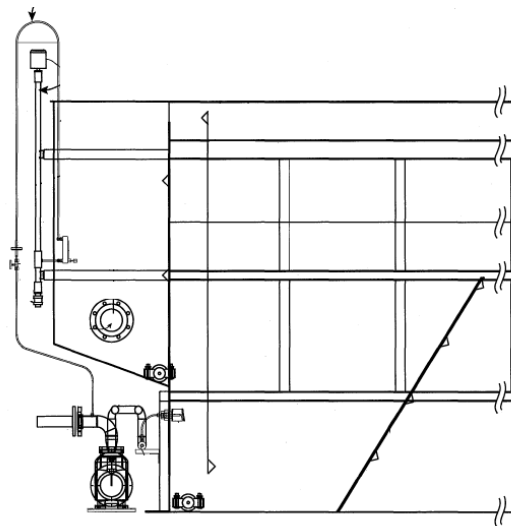
El equipo incluye un tanque de flotación, sistema de recogida de residuos, sistema de filtrado, sistema de desinfección y el sistema de control del equipo; con todos los componentes dimensionados para ajustarse dentro de un contenedor de transporte estándar. El sistema de recogida de residuos incluye un skimmer que se mueve a través de la superficie del agua en el tanque de flotación.

Tabla 26. Ficha de información alternativa 5

<b>No. de Publicación</b>	WO2012112652
<b>Nombre</b>	Dissolved air flotation system with improved white water injection system <sup>46</sup>
<b>Apoderado</b>	Sionix Corporation.
<b>Tipo de sistema</b>	Flotación por gas disuelto

Fuente: *Los autores*

Figura 37. Esquema Alternativa 5



Fuente: WO2012112652. International Application Published Under the Patent Cooperation Treaty. Sionix Corporation.

---

<sup>46</sup> WO2012112652. International Application Published Under the Patent Cooperation Treaty. Sionix Corporation.

Tabla 27. Características técnicas alternativa 5

No. ítem	Variable	Valor
1	Tamaño de Burbuja	1 - 10 $\mu\text{m}$
2	Eficiencia de Tratamiento	99.99% remoción de partículas
3	Presión de Entrada	90 psi
4	Tiempo de Retención	10 -15 min
5	Capacidad de Tratamiento	10.000 BWPD
6	Tipo de Gas	Aire. Requiere de sistema de compresión de aire.
7	Área de ocupación	Compacto.
8	Instalación	Típica instalación de facilidad fija.

Fuente: Los autores.

#### 4.1.1.6 Purificación de aguas industriales residuales por flotación.

Si bien el diseño de una celda electrolítica puede variar ampliamente, se ha encontrado ventajoso mantenerlo lo más pequeño y compacto como sea posible, sacrificando la capacidad de tratamiento. A fin de mantener el costo de energía bajo, la distancia entre electrodos debe mantenerse a menos de dos pulgadas.

Tabla 28. Ficha de información alternativa 6

<b>No. de Publicación</b>	US 3975269 A
<b>Nombre</b>	Purification of industrial waste waters by flotation <sup>47</sup>
<b>Apoderado</b>	Swift & Company
<b>Tipo de sistema</b>	Sistema de flotación electrolítica

Fuente: Los autores

Tabla 29. Características técnicas alternativa 6

No. ítem	Variable	Valor
1	Tamaño de Burbuja	20-300 $\mu\text{m}$
2	Eficiencia de Tratamiento	98,5% remoción de partículas
3	Presión de Entrada	No usa sistema de presurización.
4	Tiempo de Retención	No requiere de tiempo de retención por el sistema usado.
5	Capacidad de Tratamiento	Depende de lo que se necesite
6	Tipo de Gas	Hidrogeno, aire, oxigeno.
7	Área de ocupación	Pequeño
8	Instalación	No requiere instalación fija.

Fuente: Los autores.

---

47 3975269 A. International Application Published Under the Patent Cooperation Treaty. Swift & Company.

4.1.1.7 Equipo y metodología para generar microburbujas.

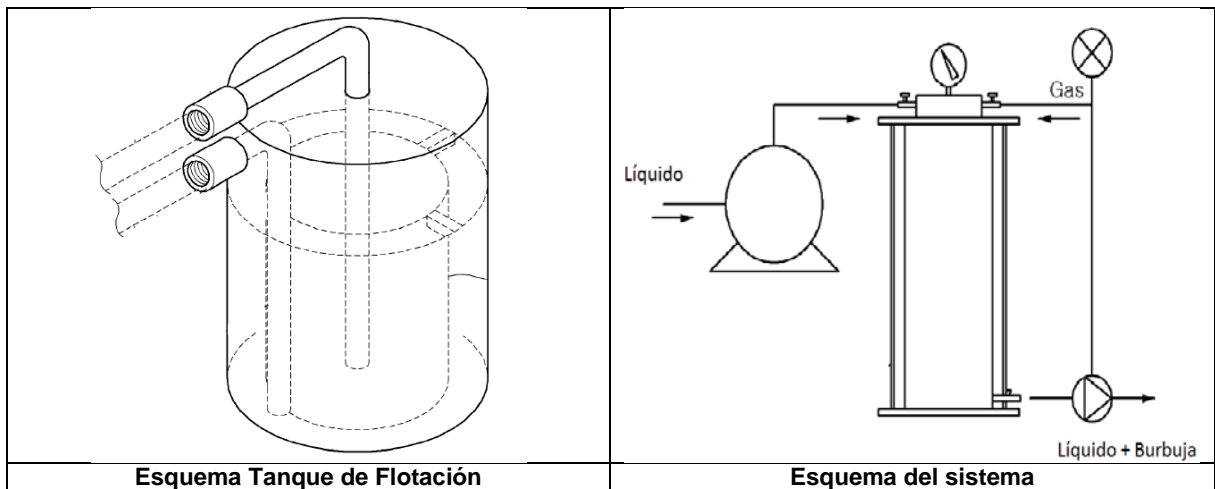
El equipo tiene una estructura mucho más simple que un sistema de generación convencional DAF. Una bomba realiza todas las funciones de una bomba de reciclaje, un compresor, y un tanque de presión. Por otra parte, la presión dentro de la cámara de mezcla y el volumen de aire inhalado en la bomba se puede ajustar por un procedimiento sencillo.

Tabla 30. Ficha de información alternativa 7

<b>No. de Publicación</b>	WO 2008147050 A1
<b>Nombre</b>	Apparatus and method for generating micro bubbles <sup>48</sup>
<b>Apoderado</b>	G & G Corea Co Ltd , Kwan Woo Lee , Jai Sub Parque
<b>Tipo de sistema</b>	Flotación por gas disuelto

Fuente: Los autores

Figura 38. Esquema Alternativa 7



Fuente: WO 2008147050 A1. International Application Published Under the Patent Cooperation Treaty. G & G Corea Co Ltd , Kwan Woo Lee , Jai Sub Parque.

<sup>48</sup> WO 2008147050 A1. International Application Published Under the Patent Cooperation Treaty. G & G Corea Co Ltd , Kwan Woo Lee , Jai Sub Parque.

Tabla 31. Características técnicas alternativa 7

No. ítem	Variable	Valor
1	Tamaño de Burbuja	22 - 34 $\mu\text{m}$
2	Eficiencia de Tratamiento	98% remoción de partículas
3	Presión de Entrada	74 psi
4	Tiempo de Retención	5 – 10 min
5	Capacidad de Tratamiento	No específica – Se puede acoplar a cualquier tipo de capacidad.
6	Tipo de Gas	Aire, oxígeno u ozono.
7	Área de ocupación	Compacto.
8	Instalación	Fácil. Una sola bomba hace lo de varias, haciendo simple la instalación.

Fuente: Los autores.

#### 4.1.1.8 Boquilla para dispersión de agua.

Este equipo se fundamenta en el diseño de una boquilla que está provista de un sistema de estrangulación, el cual mejora las condiciones de operación en comparación a boquillas basadas en válvulas de diafragma y válvulas de bola, las cuales su eficiencia es pobre.

Tabla 32. Ficha de información alternativa 8

<b>No. de Publicación</b>	WO 1996028254 A1
<b>Nombre</b>	Dispersion water nozzle <sup>49</sup>
<b>Apoderado</b>	Ahlstrom Aquaflow Oy, Pekka Korhonen
<b>Tipo de sistema</b>	Flotación por gas disuelto

Fuente: Los autores

---

49 WO 1996028254 A1. International Application Published Under the Patent Cooperation Treaty. Ahlstrom Aquaflow Oy, Pekka Korhonen.

Tabla 33. Características técnicas alternativa 8

No. Ítem	Variable	Valor
1	Tamaño de Burbuja	100 µm
2	Eficiencia de Tratamiento	95%
3	Presión de Entrada	80 psi
4	Tiempo de Retención	2 min.
5	Capacidad de Tratamiento	3.000 BWPD
6	Tipo de Gas	Aire, CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> o similares
7	Área de ocupación	Compacto.
8	Instalación	Típica instalación y construcción de obras civiles para instalaciones fijas.

**Fuente:** Los autores.

#### 4.1.2 Pesos Ponderados.

Para evaluar y seleccionar la alternativa final, se desarrolla una comparación entre los pesos ponderados de cada alternativa y se selecciona la que presente mayor satisfacción frente a los ítems evaluados.

De acuerdo a cada factor general: diseño, logística, y medio ambiente, se analiza cada uno de los criterios asignándole un valor apreciativo. Este procedimiento es importante para la toma de decisiones, debido a que se escoge el sistema que más satisfaga las necesidades.

Tabla 34. Relación de pesos ponderados y valores apreciativos de evaluación.

Criterios Generales	Factores Específicos	Pesos Ponderados	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3		Alternativa 4		Alternativa 5		Alternativa 6		Alternativa 7		Alternativa 8	
			Apreciativa	Ponderación	Apreciativa	Ponderación	Apreciativa	Ponderación	Apreciativa	Ponderación	Apreciativa	Ponderación	Apreciativa	Ponderación	Apreciativa	Ponderación	Apreciativa	Ponderación
Diseño	Tamaño de Burbuja	30,39%	8,0	2,4	8,0	2,4	8,0	2,4	9,5	2,9	9,8	3,0	6,0	1,8	8,5	2,6	7,0	2,1
	Presión de Entrada	20,15%	7,0	1,4	7,0	1,4	7,0	1,4	8,0	1,6	9,0	1,8	5,0	1,0	7,0	1,4	8,5	1,7
	Tiempo de Retención	11,34%	7,0	0,8	7,5	0,9	8,0	0,9	7,0	0,8	9,0	1,0	5,0	0,6	7,5	0,9	5,0	0,6
	Tipo de Gas	4,12%	9,5	0,4	9,5	0,4	9,5	0,4	7,0	0,3	6,5	0,3	8,0	0,3	8,0	0,3	8,0	0,3
Logística	Capacidad de Tratamiento	5,40%	7,0	0,4	6,5	0,4	9,8	0,5	9,0	0,5	6,0	0,3	8,0	0,4	8,0	0,4	4,5	0,2
	Área de Ocupación	1,80%	9,0	0,2	9,5	0,2	8,5	0,2	8,0	0,1	7,0	0,1	8,0	0,1	8,0	0,1	8,0	0,1
	Instalación	1,80%	6,0	0,1	10,0	0,2	8,0	0,1	8,5	0,2	7,0	0,1	8,5	0,2	9,0	0,2	6,0	0,1
Medio Ambiente	Eficiencia de Tratamiento	25,00%	7,0	1,8	8,0	2,0	9,5	2,4	9,0	2,3	9,9	2,5	10,0	2,5	9,5	2,4	7,0	1,8
<b>Total</b>			7,4		7,8		8,3		8,6		9,1		7,0		8,3		7,0	

**Fuente:** Modificada VELILLA, Wilmer, *et al.* Metodología de diseño conceptual para la selección de un sistema manipulador de tambores para camiones de carga. Universidad Autónoma del Caribe. Bogotá. Año 2010.

#### 4.1.3 Selección de la Mejor Tecnología Basada en el Sistema de Microburbujas.

La evaluación de las alternativas arroja como resultado que la tecnología que más se ajusta a los requerimientos anteriormente descritos, es la alternativa número cinco (5): “Sistema de flotación con aire disuelto con mejora en el sistema de inyección de agua” de la empresa *Sionix Corporation*.

Esta tecnología usa un sistema de flotación por gas disuelto, demostrando ser este el que mejor rendimiento tiene a nivel general.

Para mejorar la eficiencia del sistema común de flotación por gas disuelto, una válvula antirretorno de diafragma se incorpora en la línea de entrada del aire, está ubicada cerca de la bomba de flotación y evita el efecto de sifón de agua dentro de la línea de admisión de aire, con el fin de evitar la corrosión o la destrucción del equipo.

Así mismo, esta alternativa cuenta con un canal de flujo descendente ubicado en la zona baja del tanque o zona de deflector (a 20 cm del suelo del tanque) el cual no deja pasar burbujas con un diámetro mayor de 10  $\mu\text{m}$ , burbujas de diámetros mayores se quedan en la zona baja del deflector. En función de los caudales relativos de producción y las tasas de elevación, los parámetros se pueden ajustar para permitir que burbujas más pequeñas o más grandes se eleven, pasando por el canal un rango determinado de tamaños de burbuja.

#### 4.2 VARIACIONES IDENTIFICADAS DE SISTEMAS DE FLOTACIÓN.

Una de las razones que justifican las patentes es el hecho de que fomentan el desarrollo económico y tecnológico y promueven la competencia porque suponen una motivación financiera para los inventores a cambio de la divulgación de sus invenciones al público. El valor y el impacto del sistema de patentes debe ser constantemente ajustado y aplicarse de tal modo que se logre un equilibrio ideal

entre los intereses de los derecho-habientes, los nuevos actores del mercado y el público en general.

Una de las principales funciones del sistema de patentes consiste en difundir información de carácter técnico. La información de patentes representa una valiosa y completa fuente de información técnica, comercial y jurídica que puede ser usada directamente con fines científicos y experimentales y estimular la adaptación y mejora de la tecnología descrita en los documentos de patente una vez que se han publicado. Conscientes de la importancia de la difusión de la información de carácter técnico, son cada vez más numerosas las organizaciones que recurren a Internet para ofrecer acceso a sus bases de datos de documentos de patente<sup>50</sup>.

Es así como gracias a ellas, podemos identificar los avances tecnológicos con respecto a la literatura existente sobre el tema de Flotación, y más específicamente de los sistemas DAF.

A continuación presentamos algunas de las innovaciones identificadas en la revisión de nuevas tecnologías, respecto a la literatura existente de los sistemas de flotación, las cuales a futuro pueden desarrollarse en el diseño de otro tipo de equipos, haciendo mejorar considerablemente el proceso de flotación.

#### 4.2.1 Bomba Onyx® - EXTERRAN.<sup>51</sup>

Aunque la mayoría de las bombas no serían capaces de bombear con la inducción de gas, o al menos conllevarían problemas de cavitación severa, la bomba de ONYX crea billones de micro-burbujas a través de cizallamiento y presión. El rendimiento de esta bomba es debido a su configuración y es superior a otras tecnologías existentes en el mercado debido a sus altas presiones de descarga,

---

<sup>50</sup> Organización Mundial de la Propiedad Intelectual.

<sup>51</sup> Exterran Holdings Water Solutions. Revolift HS Flotation. Estados Unidos. [www.exterran.com](http://www.exterran.com). Año 2012.

una mayor eficiencia de saturación de gas, diseño de múltiples etapas, sello mecánico, la fiabilidad operativa y materiales estándar de construcción.

#### 4.2.2 Reactor Gas Líquido (GLR®) – EXTERRAN.<sup>52</sup>

El GLR crea burbujas en un tubo abierto sin un sistema de tapado que represente desgastes y cambios de partes. Además no se requiere una línea de gas comprimido por separado, ya que utiliza equipo venturi que utiliza una caída de presión después de la bomba para crear un vacío para succionar gas del espacio de cabeza.

#### 4.2.3 Sistema DAF World Water Works (WWW).<sup>53</sup>

El sistema tradicional de DAF se fabrica con variaciones de acero o concreto. Esta empresa ha desarrollado un medio para la construcción en polipropileno, el cual es menos costoso y más seguro de trabajar. Tolera intervalos más altos de pH, ampliando las técnicas de tratamiento y mejorando significativamente la reducción de costes operativos. Mayor duración y flexibilidad. Adicional a ello, el diseño incorpora una técnica básica para difundir el agua afluyente a través de la longitud del sistema en comparación con el enfoque estándar a través de la anchura del sistema. Esto significa una reducción del 75% en la velocidad.

---

<sup>52</sup> Exterran Holdings Water Solutions. Flotación GFT. Estados Unidos. [www.exterran.com](http://www.exterran.com). Año 2013.

<sup>53</sup> World Water Woorks. Nikuni Technology. Estados Unidos. [www.worldwaterworks.com](http://www.worldwaterworks.com). Año 2012.

#### 4.2.4 Sistema G & G Corea Co Ltd.<sup>54</sup>

El aparato para la generación de micro-burbujas de la invención tiene una estructura mucho más simple que un sistema de generación de burbuja DAF convencional. Una bomba lleva a cabo todas las funciones de una bomba de reciclaje, un compresor, y un tanque de presión. Por otra parte, la presión dentro de la cámara de mezcla y el volumen de aire inhalado en la bomba se puede ajustar mediante un procedimiento simple.

---

<sup>54</sup> WO 2008147050 A1. International Application Published Under the Patent Cooperation Treaty. G & G Corea Co Ltd , Kwan Woo Lee , Jai Sub Parque.

## 5 ANÁLISIS DE COSTOS.

En este capítulo se pretende determinar los beneficios económicos de la implementación de un proyecto de este tipo, así se puede demostrar la viabilidad del sistema para futuras aplicaciones.

Como criterios para determinar la rentabilidad de un proyecto basado en el sistema de microburbujas se tomaron como referencia los valores de inversión y mano de obra directa encontrados en el artículo “*Cost and operating factors for treatment of oily wastewater*”<sup>55</sup>, al igual que los porcentajes descritos en el mismo artículo, en el cual se describen los costos variables. Se tomó como referencia porcentajes del capital de inversión inicial: para costos operativos el 4%, depreciación del 10% y seguros e impuestos del orden del 3%<sup>56</sup>. El periodo de evaluación se ha considerado de 10 años.

Tabla 35. Relación de costos de inversión inicial

Variable	Separador Gravitacional	Tecnología Microburbujas
Costos de Inversión (No incluye terreno)	\$1'661.138,51	\$1'827.252,36

**Fuente:** Los autores.

---

<sup>55</sup> Thompson CS, Stock J, Mehta PL, Cost and operating factors for treatment of oily waste water. Oil Gas. EUA Año 1972.

<sup>56</sup> Todos los costos aquí expuestos, están enunciados en Dólares Americanos (US\$).

Tabla 36. Costos fijos operación anual

Variable	Separador Gravitacional	Tecnología Microburbujas
Mano de obra directa y gastos generales	\$ 110.742,57	\$ 110.742,57
Energía	\$ 9.689,97	\$ 14.562,65
Depreciación [10%]	\$ 166.113,85	\$ 182.725,24
Seguro e impuestos [3%]	\$ 49.834,16	\$ 54.817,57
Mantenimiento [4%]	\$ 66.445,54	\$ 73.090,09
<b>Total</b>	<b>\$ 402.826,09</b>	<b>\$ 435.938,12</b>

*Fuente:* Los autores.

Tabla 37. Costos variables operación anual para 34.560 BPD

Variable	Separador Gravitacional		Tecnología Microburbujas	
	Diario	Anual	Diario	Anual
Químicos \$/34.560 BPD <sup>57</sup>	\$ 1.196,02	\$ 436.547,20	\$ 797,35	\$ 291.031,47
Barril tratado <sup>58</sup>	\$ 14.860,80	\$ 5.424.192,00	\$ 6.912,00	\$ 2.522.880,00
<b>Total</b>	\$ 16.056,82	<b>\$ 5.860.739,20</b>	\$ 7.709,35	<b>\$ 2.813.911,47</b>

*Nota:* El costo por barril tratado se toma como \$0,43 para Separador Gravitacional y \$0,2 para Microburbujas<sup>57</sup>.

*Fuente:* Los autores.

Basándose en la **Tabla 36** y **Tabla 37**; se calcula los valores anuales de la operación de los equipos.

Tabla 38. Costos operacionales anuales

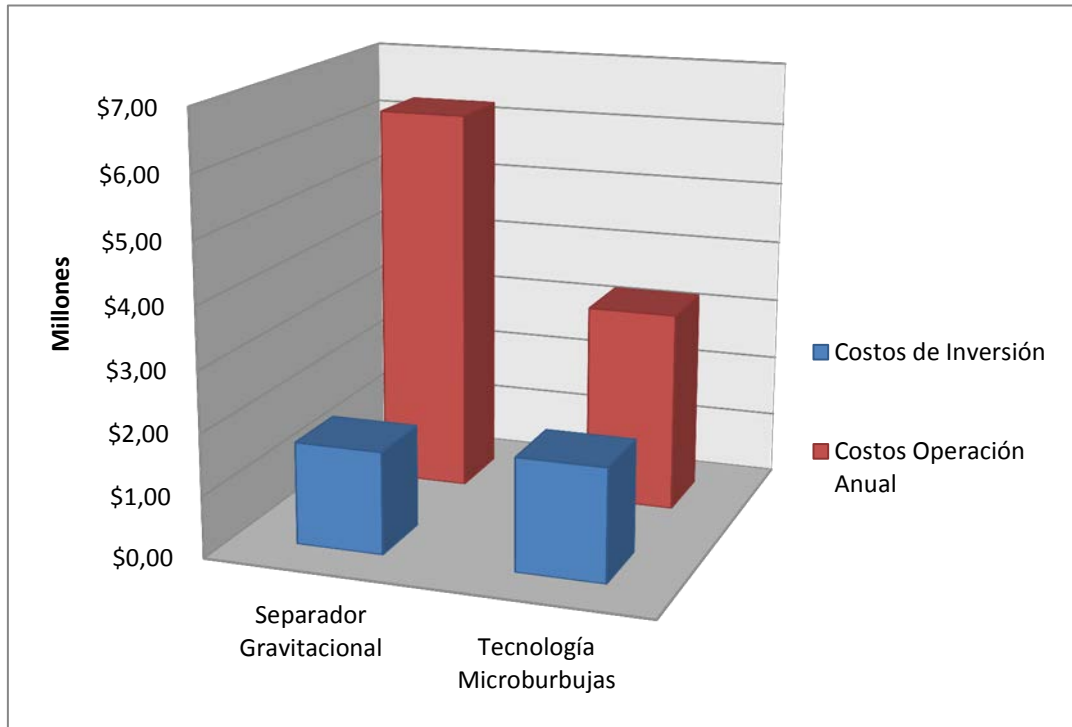
Variable	Separador Gravitacional	Tecnología Microburbujas
Costos Fijos	\$ 402.826,09	\$ 435.938,12
Costos Variables	\$ 5.860.739,20	\$ 2.813.911,47
<b>Total</b>	<b>\$ 6.263.565,29</b>	<b>\$ 3.249.849,58</b>

*Fuente:* Los autores.

<sup>57</sup> WANG Lawrence, et al., *Handbook of Environmental Engineering - Flotation Technology*. Volumen 12. Londres, Inglaterra Año 2010.

<sup>58</sup> GRL Solution: "How a Micro-bubble Flotation System Can Enhance Oil Separation and Recovery from Produced Water while Reducing Chemical and Filter Usage".

Figura 39. Comparación costos inversión inicial



*Fuente:* Los autores.

En la **Figura 39** se puede observar la comparación realizada a los costos de inversión inicial y los gastos anuales. Podemos ver que aunque inicialmente los sistemas de microburbujas representan un alto costo, son más rentables en la operación.

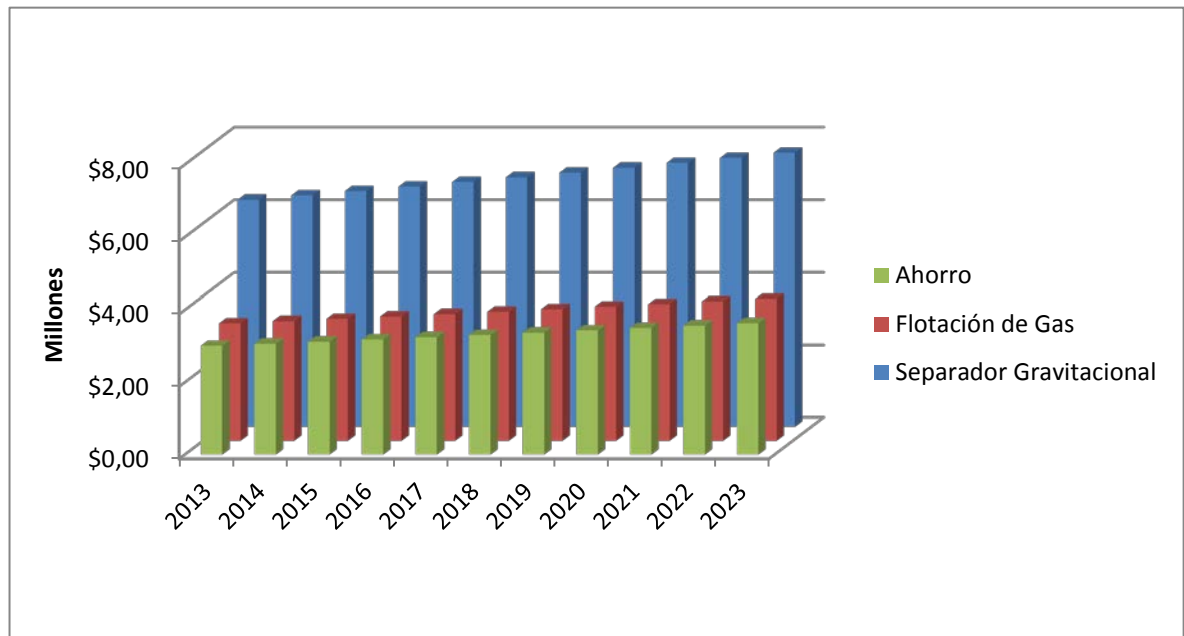
A partir de la **Tabla 38** se puede evaluar la rentabilidad a largo plazo de los dos tipos de proyectos (Separador gravitacional y tecnología de microburbujas).

Tabla 39. Relación de costos a largo plazo

No.	Año	Índice de Costos <sup>59</sup>	Separador Gravitacional	Flotación de Gas	Ahorro
0	2013	785,94	\$ 6.263.565,29	\$ 3.249.849,58	\$ 3.013.715,71
1	2014	800,88	\$ 6.382.629,93	\$ 3.311.626,25	\$ 3.071.003,68
2	2015	816,09	\$ 6.503.846,35	\$ 3.374.519,36	\$ 3.129.326,98
3	2016	831,6	\$ 6.627.453,61	\$ 3.438.652,97	\$ 3.188.800,65
4	2017	847,4	\$ 6.753.372,05	\$ 3.503.985,72	\$ 3.249.386,33
5	2018	863,5	\$ 6.881.681,33	\$ 3.570.558,97	\$ 3.311.122,37
6	2019	879,91	\$ 7.012.461,17	\$ 3.638.414,06	\$ 3.374.047,11
7	2020	896,62	\$ 7.145.631,87	\$ 3.707.509,65	\$ 3.438.122,22
8	2021	913,66	\$ 7.281.432,50	\$ 3.777.969,78	\$ 3.503.462,72
9	2022	931,02	\$ 7.419.783,39	\$ 3.849.753,11	\$ 3.570.030,28
19	2023	948,71	\$ 7.560.764,21	\$ 3.922.900,98	\$ 3.637.863,23

Fuente: Los autores.

Figura 40. Costos a largo plazo



<sup>59</sup> US Army Corps of Engineers Civil Works Construction Cost Index System. Año 2013.

Según el análisis de costos realizado, aunque un proyecto basado en el sistema de microburbujas genere un costo inicial alto debido al tipo de tecnología, en cuanto a los costos variables y fijos de la operación, comparado con un sistema convencional como la separación gravitacional en cuanto a mantenimiento, impuestos y mano de obra difieren considerablemente.

Es claro que en la relación de costos a largo plazo se observa que el sistema genera menos gastos de operación, debido al bajo o casi nulo uso de químicos y a la rentabilidad en la recuperación de partículas y aceite. Lo cual se traduce en ganancias para la empresa operadora que decida implementar un proyecto de este tipo.

## CONCLUSIONES

En la tecnología de microburbujas las variables más importantes el tamaño de la burbuja y la presión inicial, las cuales aportan a la creación de una mayor eficiencia.

La selección de cualquier tipo de equipo o proceso debe ir acompañada de una herramienta metodológica que facilita la elección de determinada tecnología, esta debe considerar diferentes aspectos relevantes desde el punto de vista principalmente técnico, económico, ambiental y social, para garantizar la sostenibilidad de la tecnología que se quiera implementar.

La flotación con gas disuelto se considera el sistema que tiene mejor eficiencia de remoción de sólidos suspendidos y gotas de aceite. Este punto se puede demostrar con el valor de ponderación de las tecnologías evaluadas, en donde los sistemas DAF llevan la delantera en su calificación.

Los sistemas de microburbujas prometen ser tecnologías innovadoras, efectivas, amigables con el medio ambiente, la industria y la economía cumpliendo cabalmente con la normativa ambiental vigente Colombiana.

Las tecnologías basadas en el sistema de microburbujas, representan una inversión inicial de alto costo comparadas con sistemas convencionales, pero su proyección a largo plazo indica mejor rentabilidad, dada su eficiencia de remoción de sólidos y gotas de aceite.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar una investigación más detallada de los sistemas de flotación de gas disuelto, pues son estos equipos los que proporcionan un tratamiento y tamaño de burbuja más adecuado para las aguas de producción.

Se sugiere mejorar la metodología de evaluación de las tecnologías basadas en sistemas de microburbujas, que aunque funciona para realizar evaluaciones para cualquier tipo de tecnología y equipo, los valores son muy subjetivos al discernimiento del evaluador.

Se sugiere realizar investigaciones a nivel de laboratorio, tomando como variables independientes la presión de suministro de gas, tipo de gas y cantidad de partículas contaminantes, ya que inciden en aquellas dependientes y determinantes en la eficiencia de tratamiento de aguas residuales de producción por medio del sistema de microburbujas, tales como tamaño de burbuja, velocidad de elevación, solubilidad del gas y relación sólido/aire.

Se sugiere que a partir de las innovaciones identificadas en este trabajo, se realice la ingeniería conceptual de un equipo que reúna estas características que suponen un avance y mejora en el sistema.

## BIBLIOGRAFÍA

Arnold, Ken y Stewart, Maurice. Surface Production Operations. Design of Oil - Handling Systems and Facilities. Primera Edición. 1999.

BLANCO SIMBAQUEBA, Johanna. y DELGADILLO AYA, Claudia L. Metodología integrada para el diseño de un monitoreo de inyección de agua desarrollado en un campo petrolero. TESIS (Ingenieras de petróleos). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingeniería fisicoquímicas, 2006.

BELLO ORTEGA, Karen María, Propuesta de Programa de Estimulación Matricial Reactiva a Pozos Productores que presentan Merma de Producción por Incrustaciones en el Área de Dación del Distrito San Tome, 2010, disponible en internet en: <http://ri.biblioteca.udo.edu.ve/bitstream/123456789/2709/1/036-TESIS.IQ.pdf>, citado el 27 de mayo de 2013.

Beychock MR (1967) Aqueous wastes from petroleum and petrochemical plants. John Wiley & Sons, New York, NY.

CALAO RUIZ Jorge Emilio, Caracterización Ambiental de la Industria Petrolera: Tecnologías Disponibles para la Prevención y Mitigación de Impactos Ambientales, 2007, disponible en internet en: [http://www.bdigital.unal.edu.co/823/1/15646742\\_2009.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/823/1/15646742_2009.pdf), citado el 5 de junio 2013.

CASTRO CASTELL, Martha Rocío. Estado del arte del sistema de tratamiento de aguas de producción en campos petroleros. TESIS (Ingenieras de petróleos). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingeniería fisicoquímica, 2004.

DEGREMONT (1979) Water treatment handbook. John Wiley & Sons, New York, NY 44. Schmidt L, Morfopoulos V (1983) Bubble formation in the dissolved air flotation process, paper presented at AIChE Meeting. Houston, TX, May

Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Tratamientos de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Tercera Edición. Bogotá. Febrero de 2004.

Guía Metodológica de Trámites para el Control de los Vertimientos en los Cuerpos de Agua Superficiales, al Suelo Asociado a un Acuífero y al Medio Marino, en Función de los Trámites y Procedimientos Requeridos para la Obtención de los Permisos de Vertimientos. Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico. Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Octubre de 2011.

HERNÁNDEZ, José y GARCÍA, María. Matrices De Ponderación para la evaluación de proveedores. Universidad Metropolitana, Departamento de Gestión Tecnológica., Venezuela. Año 2007.

Microbubble Generation. Department of Chemical and Process Engineering, University of Sheffield, Mappin Street, Sheffield S1 3JD, United Kingdom. Institute of Thermomechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic.

Ramirez ER (1979) Comparative physicochemical study of industrial waste-water treatment by electrolytic dispersed air and dissolved air flotation technologies. Proceedings of Purdue industrial waste conference, vol 34. Purdue University, West Lafayette, IN, p 699

Pan Li. Development of Advanced Water Treatment Technology Using Microbubbles. October 2006

SALAZAR MARTINEZ Adriana Ysabel, Evaluacion del Sistema de Tratamiento de la Planta de Inyección de Agua salada Del campo Santa Rosa, PDVSA, 2010, página 33-55, disponible en internet en: <http://ri.biblioteca.udo.edu.ve/bitstream/123456789/2791/1/102-TESIS.IQ.pdf>, citado el 20 de julio de 2013.

SÁNCHEZ, Gabriel. Técnicas Participativas para la Planeación. Capítulo 16. Jerarquización Analítica.

SATO Y, et al(1979) Removal of emulsified air particles by dissolved air flotation. J Chem Eng Jpn 12:454

WANG Lawrence, et al,.Handbook of Environmental Engineering - Flotation Technology. Volumen 12. Londres, Inglaterra Año 2010.

## Patentes

3975269 A. International Application Published Under the Patent Cooperation Treaty. Swift & Company.

Exterran Holdings Water Solutions. Revolift HS Flotation. Estados Unidos. [www.exterran.com](http://www.exterran.com). Año 2012.

Exterran Holdings Water Solutions. Revolift VS Flotation. Estados Unidos. [www.exterran.com](http://www.exterran.com). Año 2013.

Exterran Holdings Water Solutions. Flotación GFT. Estados Unidos. [www.exterran.com](http://www.exterran.com). Año 2013.

WO 1996028254 A1. International Application Published Under the Patent Cooperation Treaty. Ahlstrom Aquaflow Oy, Pekka Korhonen.

WO 2008147050 A1. International Application Published Under the Patent Cooperation Treaty. G & G Corea Co Ltd , Kwan Woo Lee , Jai Sub Parque.

WO 2012112652. International Application Published Under the Patent Cooperation Treaty. Sionix Corporation.

World Water Woorks. Nikuni Technology. Estados Unidos. [www.worldwaterworks.com](http://www.worldwaterworks.com). Año 2012.