

**DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE
AGUAS DE PRODUCCIÓN ECOFLOT DE ECOPETROL**



**MARIA CAMILA GARCIA PEREZ
JAVIER EDUARDO PARDO LASSO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
INGENIERÍA AUTOMÁTICA INDUSTRIAL
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
LÍNEA DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

Popayán, junio de 2016

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

**DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE
AGUAS DE PRODUCCIÓN ECOFLOT DE ECOPETROL**



**MARIA CAMILA GARCIA PEREZ
JAVIER EDUARDO PARDO LASSO**

**Monografía presentada como requisito parcial para optar por el título de
Ingeniero en Automática Industrial**

Director: Ing. Juan Fernando Flórez Marulanda

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
INGENIERIA AUTOMATICA INDUSTRIAL
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
LÍNEA DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

Popayán, junio de 2016

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE COPETROL

Nota de Aceptación: _____

Firma del jurado

Firma del jurado

Popayán, junio de 2016

DEDICATORIA

*A mis amados padres que con su dedicación y
Sacrificio me brindaron todas las herramientas
Necesarias para surgir. A mi tía Sonia por su
Incondicional e infinito apoyo. A mis hermanas:
Fernanda y Roció por su confianza y ejemplo.
A mis familiares y amigos con quienes compartí
Gratos momentos.*

*A Dios por ser siempre ese sentimiento de
Alegría, tranquilidad y serenidad en cada
Momento en esta etapa de la vida. A mis
Padres y hermanos por todo el apoyo y
Esfuerzo brindado a lo largo de la carrera.
A mis amigos por estar presente en los
Momento de dificultad.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios.

Al ingeniero Juan Fernando Flórez.

A los ingenieros del departamento de

Hidráulica y estructuras de la facultad

De Ingeniería Civil.

A la universidad del Cauca.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	12
CAPITULO I. GENERALIDADES	13
1.1 INDUSTRIA DEL PETROLEO Y GAS	13
1.2 AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO Y GAS	13
1.2.1 Definición	14
1.2.2 Generalidades aguas residuales industriales	14
1.2.3 Parámetros químicos de las aguas residuales industriales de petróleo y gas	15
1.2.4 Parámetros indicativos de contaminación orgánica y biológica.....	16
1.2.5 Normativa global para disposición de aguas ISO 14046 - Huella Hídrica.....	16
1.2.6 Normativa colombiana para disposición de aguas: Decreto 631 de 2015	17
1.2.7 Métodos de disposición de aguas residuales industriales	18
1.3 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES.....	20
1.3.1 Unidad primaria – Tratamiento primario	21
1.3.2 Unidad secundaria – Tratamiento secundario	25
1.3.3 Unidad terciaria – Tratamiento terciario.....	26
1.4 EQUIPOS EMPLEADOS EN SISTEMA TARI	28
1.4.2 Unidad secundaria.....	32
CAPITULO 2. PATENTE ECOFLOT	37
2.1 TARI EN EL CAMPO PETROLERO CANTAGALLO, BOLIVAR, COLOMBIA	37
2.1.1 Descripción del TARI implementado en Cantagallo, Bolívar, Colombia.....	39
2.2 PATENTE ECOFLOT DE ECOFLOT IMPLEMENTADA EN CANTAGALLO	45
2.2.1 Descripción Ecoflot.....	45
CAPITULO 3: ESCALAMIENTO Y DISEÑO DE PLANTA LABORATORIO ECOFLOT..	53
3.1. CONCEPTUALIZACION DE ESCALAMIENTO	53
3.1.1 Definición de escalamiento	53
3.1.2. Marco teórico.....	54
3.2. PROPUESTA METÓDICA PARA ESCALAR ECOFLOT	57
3.2.1. Criterios de selección para determinar métodos de escalamiento.....	58
3.3 DISEÑO ESTRUCTURAL DE ECOFLOT Y FUNCIONAMIENTO	65

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

3.3.1	Parámetros de operación Ecoflot.....	65
3.3.2	Diseño estructural Ecoflot prototipo.....	67
CAPITULO 4: PLANTA DE LABORATORIO ECOFLOT PROTOTIPO		83
4.1	ECOFLOT PROTOTIPO.....	83
4.2	PFD DE PLANTA ECOFLOT PROTOTIPO	85
4.3	APLICACIÓN DE LA NORMA ISA 88 PARA PLANTA ECOFLOT PROTOTIPO	87
4.3.1	Modelo de Control de Proceso de planta Ecoflot prototipo	87
4.3.2	Modelo Físico de la planta Ecoflot prototipo	89
4.3.3	Relación entre los Modelos de ISA 88.....	91
4.4	DIAGRAMA P&ID DE LA PLANTA ECOFLOT PROTOTIPO	93
4.5	CONTROL DE PLANTA ECOFLOT PROTOTIPO	97
4.5.1	Esquemas de control de planta Ecoflot prototipo.....	97
4.6	INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPOS DE LA PLANTA ECOFLOT PROTOTIPO ..	100
4.7	SIMULACIÓN DEL PROCESO EN CADSIM PLUS	100
4.7.1	Requerimientos para simulación planta Ecoflot prototipo.....	101
4.7.2	Implementación en CadSim Plus.....	101
CONCLUSIONES		112
RECOMENDACIONES		113
5.1	GENERALIDADES ECOFLOT PROTOTIPO	113
5.2	NUEVO SISTEMA BASADO EN ECOFLOT.....	113
BIBLIOGRAFIA.....		115

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Ciclo del agua en un campo maduro petrolero	14
Figura 2 Diagrama de bloques genérico de sistema tratamiento de aguas residuales industriales para un campo maduro	20
Figura 3 Figura 3. Operación de Sedimentación en el Tratamiento Primario.....	22
Figura 4 Operación de Filtración en el Tratamiento Primario.....	23
Figura 5 Sistema de Flotación con características y propiedades IAF y DAF.....	24
Figura 6 Sedimentador de Placas paralelas IPS.....	29
Figura 7 Sistema de Floculación_ Floculador tipo i-PFR.....	30
Figura 8 Filtro de Arena de la empresa GEDAR.....	30
Figura 9 Sistema de Flotación por Aire Inducido.	31
Figura 10 Clarificador DAF.....	32
Figura 11 Etapas de un ciclo de operación de un reactor SBR.....	33
Figura 12 Esquema general de un reactor UASB.....	34
Figura 13 Diagrama de flujo de proceso del TARI en un campo petrolero.....	35
Figura 14 Ubicación geográfica del campo Cantagallo - Bolívar	38
Figura 15 Playa del campo petrolero Cantagallo.....	38
Figura 16 TARI en la Isla VI del campo petrolero Cantagallo.....	40
Figura 17 PFD para TARI Cantagallo	43
Figura 18 Diagrama de la patente Ecoflot	47
Figura 19 Subetapas del proceso de flotación de Ecoflot.....	48
Figura 20 Diagrama P&ID de Ecoflot.....	52
Figura 21 Diagrama Ecoflot para modelo y prototipo	64
Figura 22 Fuerzas distribuidas y puntuales en Ecoflot.....	68
Figura 23 Vista externa tanque Ecoflot.....	71
Figura 24 Tubería primaria y secundaria de ingreso del agua a tratar.....	75
Figura 25 Venturi	75
Figura 26 Tubería primaria y secundaria de recirculación de agua	76
Figura 27 Tubería de desnate	78
Figura 28 Diagramas mecánicos de Ecoflot prototipo.....	81
Figura 29 Vista lateral 3D Ecoflot prototipo.....	82
Figura 30 Diagrama de entradas y salidas a sistema Ecoflot prototipo.....	83
Figura 31 PFD de planta de laboratorio Ecoflot prototipo.....	87
Figura 32 Relación entre los tres modelos de ISA 88 de mezclado y calentado de la planta de laboratorio por lotes Ecoflot prototipo.....	92
Figura 33 Relación entre los tres modelos de ISA 88 respecto al procesamiento de unidad Flotación.....	93
Figura 34 P&ID de la Planta de Laboratorio Ecoflot prototipo.....	96
Figura 35 Diagrama de bloques del sistema de control de nivel	99
Figura 36 Diagrama de bloques del sistema de control de temperatura.....	98
Figura 37 Simulación unidad de Mezclado y Calentado.....	103
Figura 38 Unidad de Mezclado y Calentado tras el ingreso de agua a tratar.....	105

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

Figura 39 Unidad de Flotación.	108
Figura 40 Tanque depósito de residuos.	108
Figura 41 Tanque depósito de residuos.	109

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Estándares para el agua de vertimiento.....	19
Tabla 2 Parámetros a tener en cuenta para inyección de agua.	19
Tabla 3 Tratamiento de Aguas Residuales Industriales para inyección o vertimiento.	21
Tabla 4 Etiquetas de apoyo para el diagrama de flujo de proceso del tratamiento de aguas de producción.....	35
Tabla 5 Entradas y salidas de materia en el proceso de tratamiento de aguas residuales industriales.	36
Tabla 6 Características del agua para inyección.	40
Tabla 7 Etiquetas para el PFD del proceso de TARI en la isla VI de Cantagallo.	44
Tabla 8 Entradas y salidas de materia en el proceso de TARI en la isla VI del campo Cantagallo.....	45
Tabla 9 Partes del sistema Ecoflot.	50
Tabla 10 Etiquetas relacionadas al P&ID del sistema Ecoflot.	52
Tabla 11 Números Adimensionales establecidos	63
Tabla 12. Resultados selección Ecoflot modelo y dimensionamiento Ecoflot prototipo	64
Tabla 13 Parámetros de operación Ecoflot.....	66
Tabla 14 Especificaciones tanque Ecoflot prototipo	70
Tabla 15 Dimensiones y parámetros de tubería de suministro de agua a tratar en Ecoflot prototipo.....	74
Tabla 16 Especificaciones comerciales de tubo venturi usado para generación de burbujas Ecoflot prototipo.....	75
Tabla 17 Dimensiones de tubería de recirculación de agua para Ecoflot prototipo.	76
Tabla 18 Volumen de aceite requerido para 80 ppm.....	77
Tabla 19 Parámetros de entradas y salidas Ecoflot prototipo.....	84
Tabla 20 Entradas y salidas de planta de laboratorio Ecoflot prototipo.....	85
Tabla 21 Modelo de Control de Proceso de planta de laboratorio tipo lotes Ecoflot prototipo.....	88
Tabla 22 Modelo Físico de planta de laboratorio Ecoflot prototipo.....	89
Tabla 23 Modelo de Control de Procedimiento de planta de laboratorio Ecoflot prototipo tipo lotes.....	90
Tabla 24 Lazos de control y etiquetas de los elementos del P&ID planta de laboratorio...	94
Tabla 25 Etiquetas de tubería del P&ID.....	97
Tabla 26 Valores iniciales de los componentes de la corriente de proceso.....	104
Tabla 27 Parámetros relacionados a equipos de la unidad de mezclado y calentado	104
Tabla 28 Parámetros relacionados a equipos de la unidad de flotación.....	107
Tabla 29 Comportamiento de la unidad de mezclado y almacenado.....	109
Tabla 30 Comportamiento de la unidad de flotación.....	110

RESUMEN

TITULO:

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION ECOFLOT DE ECOPETROL

AUTORES:

MARIA CAMILA GARCIA PEREZ

JAVIER EDUARDO PARDO LASSO

PALABRAS CLAVES:

Aguas residuales industriales, Ecoflot, campo petrolero, inyección, flotación.

DESCRIPCION:

Las aguas residuales de la industria petrolera conforman uno de los subproductos más costosos y difíciles de tratar. El impacto ambiental, las normativas de regulación en Colombia y los costos de tratamiento, conforman los aspectos fundamentales por los que dichas agua no pasan desapercibidas dentro de planeación de un campo petrolero. Por tanto, los ingenieros y demás profesionales del área buscan estrategias para minimizar el impacto de esta problemática, como la reutilización de dichas aguas producidas para inyección en el mismo campo productor. Sin embargo, no es suficiente realizar estudios de factibilidad para determinar si el campo es apto para inyección. El planteamiento de la industria del petróleo enmarca también el desarrollo de nuevas técnicas y sistemas, que permitan tratar y disminuir los contaminantes de dichas aguas para su disposición final.

Ecoflot es una tecnología resultante de una patente de Ecopetrol S.A. diseñada e implementada para mejorar la operación de flotación usada en el tratamiento de aguas residuales en campo, tras emplear una combinación de técnicas existentes para mejorar la operatividad y disminuir costos y gastos. Asimismo, Ecoflot pretende disminuir las concentraciones de sólidos suspendidos y demás residuos encontrados en las aguas residuales dispuestas a tratamiento. Sin embargo, con el paso del tiempo la tecnología implementada en campo disminuyo su eficiencia de remoción notablemente. Sumado a ello, dicha tecnología no cuenta con la supervisión de un experto en su composición y operación, que lleve a cabo un mantenimiento para dar solución a los problemas de eficiencia del inmenso tanque.

En este trabajo, se desarrolla una propuesta metódica conformada por tres fases (elección de datos, escalamiento por similitud geométrica y verificación teórica por análisis dimensional) para escalar inversamente la tecnología Ecoflot y obtener un diseño a escala de laboratorio del sistema, de tal forma que permita experimentar y encontrar estrategias que aumenten la eficiencia, rentabilidad y operatividad de la etapa de flotación del tratamiento de aguas residuales.

INTRODUCCION

El desarrollo del mundo depende, en gran parte, de la energía que consume generada por recursos no renovables como el petróleo. Sin embargo, la economía petrolera está sometida a cambios en su valor comercial, razón por la cual, la industria se ve en la obligación de ampliar y/o mejorar su portafolio de servicios. A la fecha (junio del 2016), el precio del petróleo ha tenido una disminución notable desde su valor más alto, que activan planes de contingencia como: desarrollo de nuevas técnicas que ayuden a mejorar y optimizar procesos relacionados con productos y subproductos de los hidrocarburos.

La patente W 2010 /067187 (Ecoflot) es una tecnología de microburbujas que trata a un menor costo las aguas de producción generadas en los campos maduros. Para ello, se hace uso de un inmenso tanque, en donde se ejecuta la operación de flotación del tratamiento de aguas. Sin embargo, por razones varias la eficiencia de dicha tecnología ha decaído notablemente desde el momento de su instalación en algunos campos de Ecopetrol, por lo que se busca estrategias para mejorar la operatividad del sistema. Igualmente tanto Ecopetrol como el ICP (Instituto Colombiano del Petróleo) mantienen una serie de aspectos abiertos con respecto al proceso y tecnología de la patente W 2010 /067187, que es necesario estudiar a nivel de laboratorio para experimentar y determinar mejoras. Para contribuir a la solución de esta problemática, se plantea el siguiente interrogante: *¿Cómo diseñar el proceso Ecoflot de Ecopetrol para tratar aguas residuales en una planta de laboratorio?*, de tal forma que se implemente en un tanque de menor tamaño e igual comportamiento.

En consecuencia de lo anterior, este proyecto presenta como objetivo central: diseñar a escala de laboratorio el sistema de limpieza de aguas de producción Ecoflot patentada por la empresa Ecopetrol S.A. El diseño a nivel de laboratorio del proceso de limpieza de aguas de producción por microburbujas, que será desarrollado, hace parte de un contrato de licenciamiento de la patente establecido entre la Universidad del Cauca y Ecopetrol S.A, que tiene como fin intercambiar conocimientos y desarrollar una serie de técnicas y tecnologías que permitan mejorar y masificar Ecoflot en los campos petroleros de Colombia y en otras industrias.

CAPITULO I. GENERALIDADES

Resumen: El presente capítulo introduce a los sistemas y conceptos usados para el tratamiento de aguas residuales industriales de petróleo y gas, enmarcado en etapas que se ejecutan por operaciones y equipos específicos. Posteriormente, se hace un diagrama genérico de flujo de proceso del sistema de tratamientos de aguas, que sintetiza los aspectos más relevantes de dicho proceso.

1.1 INDUSTRIA DEL PETROLEO Y GAS

Los campos maduros petroleros se caracterizan por el gran volumen de aguas residuales generadas en etapas de producción, transporte y refinación. Mundialmente las cifras son similares; por cada barril de petróleo se generan entre 3 y 5 barriles de agua [9]. Si bien es difícil hablar de cifras exactas, estudios publicados por SPE (Society of Petroleum Engineers) arrojaron que para el año 2014, el volumen de agua asociada a la explotación de petróleo era aproximado a 270 millones de barriles por día, cifra que tiende a crecer [10]. Dichas aguas producidas se componen de materiales contaminantes, tanto disueltos como suspendidos, que fundamentan la importancia de implementar un sistema eficiente para el tratamiento, que permita contrarrestar los efectos tanto ambientales (regulaciones gubernamentales) como económicos (el tratamiento ineficiente de aguas residuales industriales afecta la rentabilidad de los campos maduros) que puedan tener [11].

Los estudios actuales tanto de la academia como de la industria del sector petrolero, están encaminados a mejorar la eficiencia de las técnicas de tratamiento de aguas de producción, para obtener un agua más limpia. La calidad del agua se puede lograr por medio de diferentes etapas, asociadas al material que se desea retirar. Por ejemplo, la remoción de partículas de mayor diámetro se efectúa con técnicas sencillas de sedimentación o filtración. Sin embargo, para retirar partículas más pequeñas como micro gotas de aceite, se emplean técnicas de flotación que a través de micro burbujas permiten clarificar el agua para finalmente ser dispuestas a vertimientos o inyección [12].

1.2 AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO Y GAS

Las aguas residuales industriales o también llamadas aguas de producción o salmueras, componen aproximadamente el 59% del uso total de agua dulce en el planeta tierra, de ahí la importancia de su tratamiento en la industria del petróleo y gas antes de su disposición [13].

1.2.1 Definición

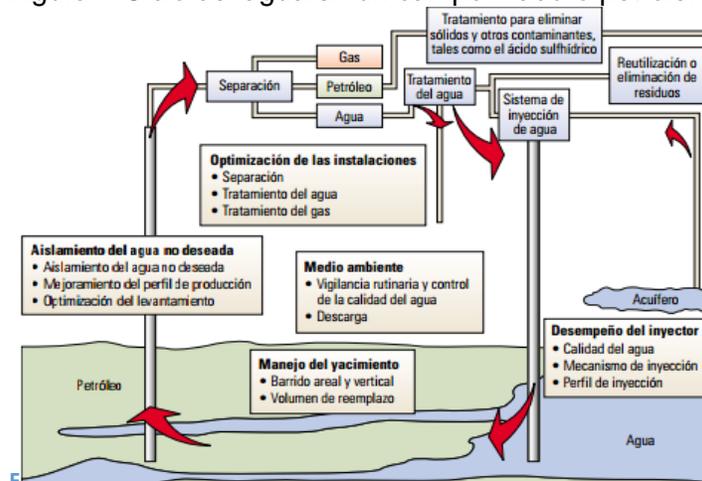
Aguas residuales industriales: todas las aguas residuales vertidas desde locales utilizados para efectuar cualquier actividad comercial o industrial, que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escorrentía pluvial [6].

Las aguas residuales industriales, a diferencia de las aguas residuales domésticas, tienen componentes característicos de difícil remoción, que son inmunes a tratamientos convencionales dispuestos para aguas residuales domésticas [13].

1.2.2 Generalidades aguas residuales industriales

Los campos maduros de petróleo alteran las propiedades del agua, en cada una de las etapas en la que es empleada y/o extraída. Típicamente las modificaciones del pH, temperatura, contenido de gas disuelto, sólidos en suspensión y población bacteriana son modificadas por los residuos y componentes propios del petróleo. Sin embargo, dicha agua es la responsable de impulsar la producción, debido a que las arenas petrolíferas son barridas horizontal y verticalmente por agua, para generar un flujo que permita la circulación y posterior extracción del hidrocarburo (Ver ciclo completo en figura 1). Conjuntamente se debe dar un manejo saludable al agua empleada; para ello, se realizan evaluaciones y diagnósticos que permitan determinar componentes y dimensionar alteraciones fisicoquímicas del agua para un correcto diseño de un sistema eficiente para el manejo del agua [11].

Figura 1 Ciclo del agua en un campo maduro petrolero



Fuente: Tomado de [11]

1.2.3 Parámetros químicos de las aguas residuales industriales de petróleo y gas

Los parámetros químicos de las aguas residuales industriales son determinados por las condiciones geográficas del campo maduro de donde se extraen. Por esta razón, no se puede hablar de características específicas sin tener la certeza del campo maduro al que pertenecen. Sin embargo, hay parámetros químicos y físicos que son alterados de forma general, tales como [15]:

- a) pH: determina la concentración de iones de hidrógeno. La industria petrolera tiene como valor deseado para la neutralización, un pH entre 6 y 8 que caracteriza a las aguas naturales no contaminadas.
- b) Dureza: es debida a la presencia de sales disueltas de calcio y magnesio y determina la capacidad que tiene el agua para producir incrustaciones. Para disminuir la dureza de las aguas residuales industriales se sugieren tratamientos de desmineralización dependiendo de los índices específicos que presenten las aguas del campo a diagnosticar.
- c) Alcalinidad: es la medida de la capacidad para neutralizar ácidos y permite una corrección al valor ideal por medio de descarbonatación, tratamientos con ácidos diagnosticados o desmineralización por intercambio iónico.
- d) Coloides: es la medida del material suspendido en el agua residual, que dependiendo del tamaño de las partículas puede comportarse como una solución. Dichos coloides pueden ser de origen orgánico o inorgánico. Esta propiedad es alterada en grandes magnitudes por los campos maduros, por lo que existen numerosas etapas del proceso de tratamiento de aguas que hacen énfasis en ello, como: sedimentación, coagulación-floculación e incluso ultrafiltración.
- e) Acidez mineral: es la capacidad de neutralizar bases. Las aguas superficiales de los campos, son contaminadas en la extracción por ácidos de drenaje que alteran la propiedad.
- f) Sólidos disueltos: o salinidad total, es la medida de la cantidad disuelta en el agua. Corresponde al residuo seco con filtración previa. El origen de los sólidos disueltos varía dependiendo de si las aguas residuales son subterráneas o superficiales.
- g) Sólidos en suspensión: hace referencia a los sólidos sedimentables que varían en características y cantidad según el origen, circunstancias de captación y ubicación geográfica del campo en explotación.
- h) Metales tóxicos: los más comunes en procesos petroleros son arsénico, cadmio, plomo, cromo, bario y selenio. Según el uso posterior de las aguas residuales, se debe tener estricto control en la disposición de los metales mediante espectrofotometría de absorción atómica.

Asimismo, hay otros parámetros químicos que son alterados y que dependiendo del post-uso de las aguas (vertimiento o inyección) deben ser analizados con mayor atención, como: cloruros, sulfatos, nitratos, fosfatos, hierro, manganeso, metales tóxicos, gases disueltos, fenoles [15].

1.2.4 Parámetros indicativos de contaminación orgánica y biológica

Los vertidos industriales en general contienen compuestos orgánicos como aceites y disolventes, que varían por diferentes causas y obligan a ajustes permanentes en los sistemas de tratamiento. Cuando se disponen las aguas residuales industriales especialmente para vertimiento, es necesario mantener la concentración de oxígeno adecuada para la supervivencia de los ecosistemas en los que se dispondrá. Por esta razón, es indispensable analizar otros parámetros indicativos de contaminación orgánica y biológica, que permitan diseñar etapas de tratamiento exclusivamente para estas alteraciones [15]. Entre los parámetros más sobresalientes se encuentra:

- a) Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): es la cantidad de oxígeno consumido en la eliminación de materia orgánica de aguas residuales industriales a través de procesos biológicos aerobios. La cantidad de DBO se equilibra mediante etapas fisicoquímicas y biológicas, (aerobias y anaerobias) que están inmersas en el tratamiento de aguas residuales industriales [15].
- b) Demanda química de oxígeno (DQO): es la capacidad de consumo de oxígeno químico, dicromato o permanganato, por las materias oxidables contenidas en el agua a tratar. Este parámetro debe ser monitoreado estrictamente tanto para vertimiento como para inyección en el proceso, porque además de alterar la flora y fauna de los ecosistemas vertidos, puede alterar los procesos industriales [15].

1.2.5 Normativa global para disposición de aguas ISO 14046 - Huella Hídrica

En la actualidad, el gobierno de cada país y empresas (públicas y privadas) tienen como prioridad ser sostenibles, sin embargo, existen diferentes causas que los expertos deben tratar para cumplir con ese objetivo. Varias de esas causas van encaminadas a la demanda excesiva de recursos naturales e impactos ambientales. Es por esta razón que, internacionalmente, se han tomado medidas para reducir dicha demanda (especialmente relacionadas con el agua y sus consecuencias para el cambio climático), a través de la comprensión de sucesos relacionadas con dicha “huella”, y que han permitido desencadenar una búsqueda de estrategias y metodologías, plasmadas en indicadores, que cuantifican el potencial del impacto ambiental sobre el agua en un producto, proceso u organización [16]. En síntesis, los indicadores y metodologías mencionadas

anteriormente, se han resumido en la norma internacional 14046 desarrollada por La Organización Internacional de Normalización (ISO), en donde se afirma:

“Gestión ambiental - Huella hídrica - Principios, requisitos y directrices, que tiene la intención de proporcionar a los responsables de tomar decisiones en la industria, el gobierno y organizaciones no gubernamentales con un medio para estimar el impacto potencial del uso del agua y la contaminación, con base en una evaluación del ciclo de vida” [16].

“Los requisitos y recomendaciones que figuran en la norma ISO 14046 proporcionan elementos para la comprensión del uso del agua, así mismo, ser mejorada por la contabilidad de los volúmenes utilizados y cuantificar la escasez y la contaminación, así como otros impactos relacionados [16].

Al aplicar la norma ISO 14046, social, ambiental, legal, cultural, política y organizativa, la diversidad debe ser considerada, así como las diferencias en las condiciones económicas” [16].

1.2.6 Normativa colombiana para disposición de aguas: Decreto 631 de 2015

Así como a nivel internacional ISO sugiere una metodología para la manipular el agua de cada organización, para Colombia existe el decreto 631 de 2015 que establece los parámetros de disposición para descarga de aguas de todas las industrias y aguas domésticas. A continuación, se detalla:

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) con el fin de contribuir al sostenimiento del medio ambiente y mejorar la calidad de las arterias fluviales de Colombia, presentó la norma que rige Vertimientos Puntuales a Cuerpos de Aguas Superficiales y Sistemas de Alcantarillado Público, para reducir y controlar afluentes con sustancias contaminantes, que llegaran a cuerpos de aguas naturales y/o artificiales (ríos, embalses, lagunas, entre otros); además, del sistema de alcantarillado público. Cronológicamente, la resolución 631 de 2015 es la evolución del artículo 28 del Decreto 3930 de 2010, que tiene sus orígenes en el decreto 1594 de 1984 [17]. En ese orden de ideas, el Decreto 631 de 2015 (ver anexo 1) expone en su preámbulo:

“La Resolución 631 de 2015 establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público en la República de Colombia.

El ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible, mediante la resolución 631 del 17 de marzo 2015, en uso de sus facultades legales y en especial las conferidas por el numeral 25 del artículo 5 de la ley 99 de 1993 y el artículo 28 del

decreto 3930 de 2010 modificado por el artículo 1 del Decreto 4728 de 2010 y, considerando:

Que el artículo 49 de la constitución política que establecen que el saneamiento ambiental es un servicio público del Estado.

Que los artículos 79 y 80 de la Constitución Política establecen como obligación del Estado, proteger la diversidad e integridad del ambiente; fomentar la educación ambiental; prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental; imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados.

Que de acuerdo con el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010, modificado por el artículo 1 del Decreto 4728 de 2010, corresponde al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible tiene entre sus funciones, regular las condiciones generales para el saneamiento del medio ambiente y dictar regulaciones de carácter general tendientes a controlar y reducir la contaminación hídrica en todo el territorio nacional (numerales 2 y 11).”

1.2.7 Métodos de disposición de aguas residuales industriales

El diseño para el tratamiento de aguas residuales industriales depende en gran parte de la disposición final del fluido. Alrededor del mundo, se emplean diferentes técnicas de eliminación y disposición, que varían según los componentes, costos económicos de campos a tratar y ubicaciones geográficas del campo. Las técnicas más usadas, se conocen bajo los nombres: vertimiento controlado en aguas superficiales, vertimiento controlado en ambientes marinos costeros, inyección para mantenimiento de presión (método de recuperación secundaria), inyección en pozos profundos, entre otros. Sin embargo, tras varios estudios técnicos y económicos, y métodos de disposición puestos en marcha por las petroleras, se puede inferir que la inyección de las aguas tratadas es el método más eficaz visto desde diferentes aspectos, como: reducción del impacto ambiental, mantenimiento de la presión del yacimiento y reducción de los costos y gastos del campo [18].

- a) Vertimiento: en esta metodología de descarga, se tiene como objetivo principal verter el fluido tratado en cuerpos de agua naturales (ríos, lagos, ente otros) y alrededores al campo petrolero. Sin embargo, esta disposición final se enmarca en diferentes normas y leyes impuestas por el país o zona afectada. En Colombia, el vertimiento de aguas residuales de producción está regulado por el MADS territorial, y las corporaciones autónomas regionales de cada departamento. En consecuencia, los campos petroleros definen sus condiciones fisicoquímicas mínimas de vertimiento (ver tabla 1) con base al decreto 631 de 2015 (ver anexo 1) (basado a su vez en el

artículo 21594 de 1984). Es importante resaltar que los decretos son dinámicos y están en constante cambio[18].

Tabla 1 Parámetros estandarizados para el agua de vertimiento

Parámetro	Rango
pH	5 -9
Temperatura	< 40 ° C
Material flotante	Ausente
Grasas y Aceites	Remoción >80%
Solidos Suspendidos	Remoción >80% en carga
D.B.O	Remoción >80% en carga
D.Q.O	Remoción >80% en carga
Fenoles	< 0.2 mg/l
Bario	< 5 mg/l

Fuente: Tomado de [19] [17].

Si las aguas residuales tratadas no cumplen con las cantidades mínimas de parámetros antes mencionadas, no se permite el vertimiento porque prima la conservación de las condiciones naturales del ecosistema afectado.

- b) Inyección: también llamada reinyección de agua a la formación y/o riego a arenas petrolíferas. En términos generales, uno de los objetivos de este proceso, es llevar el agua producida a la superficie para ser tratada según características del campo, y posteriormente usarla para mantener la presión dentro del yacimiento y mejorar la recuperación de crudo.

Desde una visión general, la disposición de aguas requiere de estudios detallados de aspectos que influyen en la eficiencia del sistema de tratamiento, tales como:

- Criterios propios del yacimiento, pozo inyector y campo en general.
- Caracterización del agua residual industrial.
- Facilidades utilizadas para la disposición de aguas.

Sin embargo, es importante aclarar, que no todos los yacimientos pueden recibir aguas para inyección, debido a incompatibilidad con el agua reciclada, que ocasionara un envejecimiento prematuro del campo maduro y por ende, desencadenará pérdidas económicas considerables. A continuación, se presentan los parámetros más importantes a tener en cuenta a la hora de verificar la posible inyección del campo (ver tabla 2):

Tabla 2 Parámetros a tener en cuenta para inyección de agua.

Propiedades de las rocas	Propiedades del fluido
Porosidad	Viscosidad
Permeabilidad	Miscibilidad
Capilaridad	Movilidad
Humectabilidad	Compatibilidad
Heterogeneidad del yacimiento	Saturaciones irreducibles
Saturaciones iniciales	Tipo de agua de formación

Efectos de permeabilidad direccional

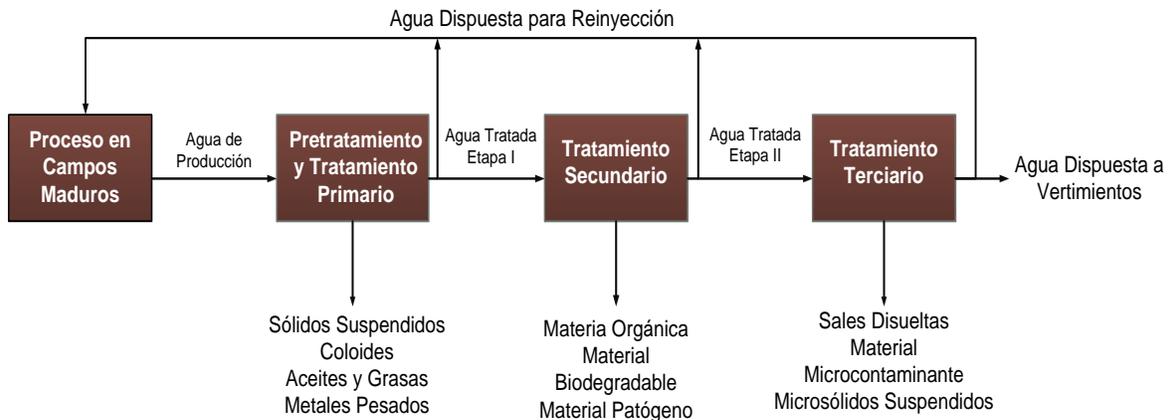
Fuente: Tomado de [18].

1.3 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

Para el tratamiento de aguas residuales industriales (TARI) del sector petrolero, se emplean diversas técnicas y metodologías para tratamientos (varían dependiendo de las características geográficas de donde se extraen las aguas), que son investigadas científicamente por la academia y puestos en marcha por empresas para cumplir con objetivos económicos, sociales y ambientales. Las tecnologías se han clasificado en tratamientos primarios, secundarios y terciarios, que corresponden a unidades de proceso en donde según el tipo de remoción que se efectúa, se determinan operaciones para atender a las nuevas aplicaciones de sostenibilidad de empresas petroleras. En las diferentes unidades de proceso, se cubren operaciones específicas como retirar hidrocarburos, grasas y sólidos de la fase acuosa, y adecuar el agua para la inyección al mismo proceso, o vertimiento en algún acuífero; dichas tecnologías se clasifican a su vez en emergentes o convencionales [13].

Las etapas del TARI son similares a los tratamientos de aguas residuales domésticas, si se abordan de forma general. Teniendo en cuenta los costos, las condiciones demográficas y el tipo de proceso se debe diseñar un sistema TARI, según lo sugiere el diagrama genérico expuesto por los autores (ver figura 2).

Figura 2 Diagrama de bloques genérico de un sistema tratamiento de aguas residuales industriales para un campo maduro



Fuente: propia, Septiembre 2015.

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE COPETROL

Asimismo, se establecen operaciones enmarcadas dentro de las unidades: primaria, secundaria y terciaria, que dependiendo de los parámetros del agua a tratar, se ejecutan en su totalidad en el diseño de la planta. Adicionalmente, las fases de cada operación representan las soluciones metodológicas existentes para el cumplimiento de cada objetivo (ver tabla 3).

Tabla 3 Tratamiento de Aguas Residuales Industriales para inyección o vertimiento.

Tratamiento (Unidad de Proceso)	Operación	Solución Fases	Equipo (Ejemplo)
Primario (Unidad Primaria)	Filtración	Sistemas de filtración que permiten remover sólidos gruesos	GEDAR- Filtro de Arena
	Sedimentación	Sistemas de sedimentación que permiten remover partículas pesadas	Sedimentador de placas paralelas IPS
	Coagulación y Floculación	Sistemas de coagulación y Floculación que desarrollan flóculos a partir de materiales emulsificados en el agua	NCF Sistemas de coagulación y floculación
	Flotación	Sistemas de flotación que removerán los sólidos finos y los flóculos generados por un sistema de coagulación/floculación	Sistemas de Flotación IAF y DAF
Secundario (Unidad Secundaria)	Biológico Aerobio	Sistemas de tratamiento biológico aerobio, eliminación de la materia contaminante se hace por medio de la adición de aire al agua residual	Reactores secuenciales de flujo discontinuo (SBR)
	Biológico Anaerobio	Sistemas de tratamiento biológico anaerobio, la eliminación de la materia contaminante en el agua residual se produce bajo condiciones anaeróbicas (sin presencia de oxígeno)	Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (UASB)
Terciario (Unidad Terciaria)	Filtración	Filtro de Arena, filtros de medio filtrantes granulares, filtros de carbón activado, filtros de carbón activado con sistema de aireación, desinfección y sistemas de membranas, tipos MF, UF y RO	

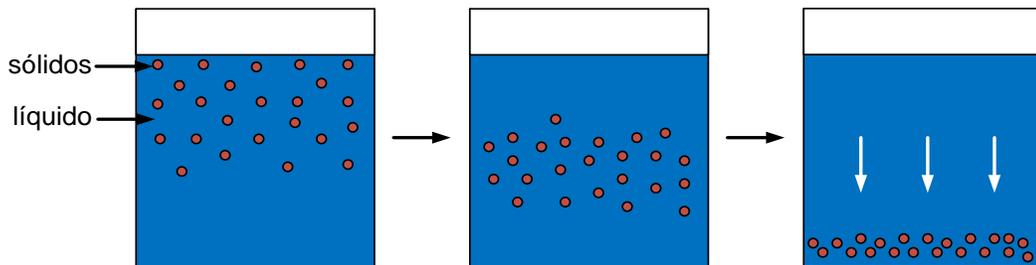
Fuente: propia, Septiembre 2015.

1.3.1 Unidad primaria – Tratamiento primario

Es la unidad en la que se equilibran los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales industriales. La unidad primaria tiene como objetivo central, retirar de la fase acuosa hidrocarburos, grasas, sólidos en suspensión, metales y coloides, mediante las operaciones de Sedimentación, Flotación, Filtración y Coagulación/Floculación:

- a) **Sedimentación:** El objetivo en esta operación primaria es la reducción de los sólidos en suspensión de las aguas residuales industriales, bajo la exclusiva acción de la gravedad, que hace que una partícula más densa que el agua adquiera una trayectoria descendente y se deposite en el fondo del sedimentador (ver figura 3) [20]. Por tanto, solo se pretende la eliminación de sólidos sedimentables y materias flotantes. Esta operación será más eficiente, si el tamaño y densidad de las partículas a separar es grande, e influye en la velocidad de sedimentación [21].

Figura 3 Figura 3. Operación de Sedimentación en el Tratamiento Primario.



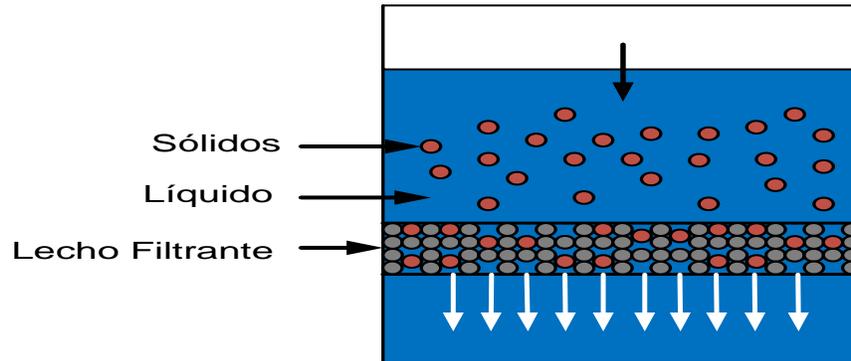
Fuente: propia, Septiembre 2015.

- b) **Filtración:** se utiliza como medio filtrante, un medio poroso formado por material granular (grava, arena, antracita, etc.). El líquido a filtrar se hace pasar a través del lecho poroso, por gravedad o mediante presión, para que los sólidos queden atrapados en espacios intersticiales ubicados entre las partículas, y así, conformar el lecho filtrante (ver figura 4). Para filtrar un efluente con un alto contenido de sólidos, la opción más conveniente son filtros granulares; y cuando el contenido en sólidos es bajo o moderado, los cartuchos de filtración son la solución más adecuada, gracias a su eficiencia y poco espacio que requieren [22]. Para mejorar la eficacia de esta operación es habitual realizar un proceso de coagulación-floculación previo [13].

La filtración se puede clasificar en:

- Filtración por gravedad
- Filtración a presión
- Filtración rápida
- Filtración lenta
- Filtración en profundidad

Figura 4 Operación de Filtración en el Tratamiento Primario.



Fuente: propia, Septiembre 2015.

c) Flotación: En esta operación se desarrolla el método de separación, que consiste en remover las partículas del agua residual. Esta parte del proceso es realizado mediante la generación y dispersión de burbujas de gas, las cuales se adhieren a los sólidos suspendidos o partículas disueltas, que posteriormente ascienden a la superficie del líquido donde son eliminados. La flotación por aire puede ser un método de separación eficiente, especialmente cuando se desean eliminar partículas finas o livianas del agua a tratar [23]. Según el método para introducir el agente, que permite la flotación, puede clasificarse la flotación en dos tipos:

- Flotación por Aire Disuelto (DAF): es un proceso de separación sólido/líquido y/o líquido/líquido, que utiliza microburbujas para lograr el objetivo. La separación se consigue introduciendo finas burbujas de aire en la fase líquida, las cuales se forman por una reducción de la presión de una corriente de agua previamente saturada con aire (gas). Las burbujas se adhieren a las partículas, y la fuerza de ascenso, que experimenta el conjunto partícula-burbuja de aire hace que suban hasta la superficie del líquido. De esta forma, es posible hacer subir hasta la superficie partículas cuya densidad es diferente a la del líquido a tratar, como es el caso de los aceites en agua residuales [24]. Los elementos principales de estos equipos son: bomba de presurización, equipo de inyección de aire, tanque de retención o saturador y unidad de flotación [13]. Este proceso es ampliamente utilizado en TARI para eliminación o separación de iones metálicos, aniones, aceite, grasas, productos químicos, microorganismos, coloides y partículas ultra finas. Una desventaja

del proceso es el alto costo de la saturación de agua necesaria para la formación de burbujas [25].

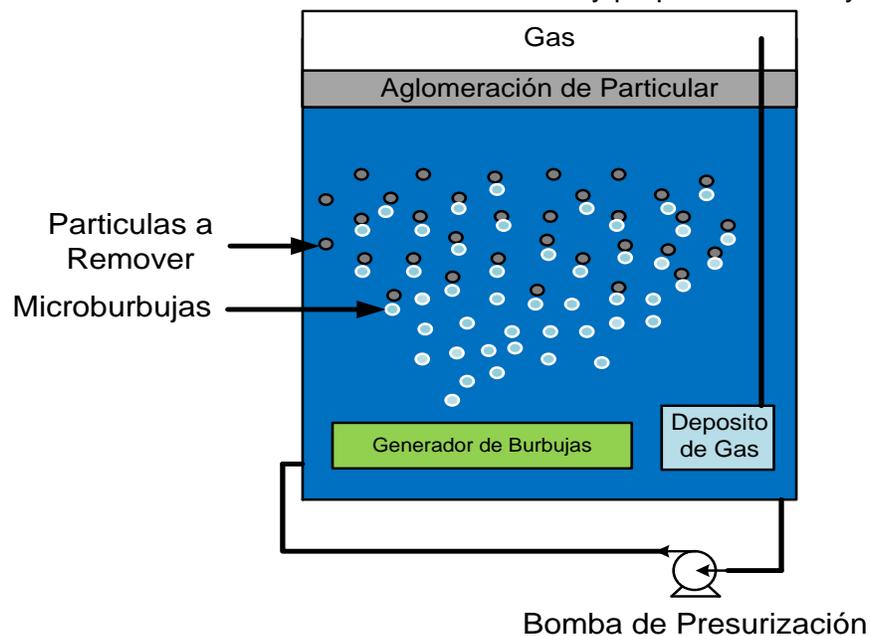
- Flotación por Aire Inducido (IAF): este proceso opera de manera similar al anterior, pero la generación de burbujas se realiza a través de difusores de aire, normalmente, situados en la parte inferior del equipo de flotación, o bien inducidas por rotores o agitadores [13]. Este método se utiliza en la industria petroquímica para la separación de aceite/agua [25].

Las dos técnicas nombradas anteriormente son las más relevantes para TARI en la industria petrolera, sin embargo, se encuentran otras como:

- Electroflotación
- Boquillas de Flotación
- Columnas de Flotación
- Flotación Centrifuga
- Jet de Flotación

En la actualidad, existe un sistema de flotación compuesto por una combinación de características y propiedades de sistemas DAF e IAF (ver figura 5), sin embargo, el funcionamiento de dicha tecnología es la parte central del desarrollo de este trabajo de pregrado y será explicado de forma detallada en el transcurso del documento.

Figura 5 Sistema de Flotación con características y propiedades IAF y DAF.



Fuente: propia, Septiembre 2015.

d) Coagulación/Floculación: En el proceso TARI, existen casos en los que la materia en suspensión comprende partículas muy pequeñas, que conforman suspensiones coloidales, y en la mayoría de casos son muy estables debido a interacciones eléctricas entre las partículas [13]. En función de ello, se desarrollan operaciones de coagulación y/o floculación; donde la coagulación es el proceso en que se desestabilizan las partículas coloidales y suspensiones sólidas muy finas, de modo, que puedan comenzar a aglomerarse cuando las condiciones son las apropiadas. Este proceso favorece a la floculación para obtener partículas fácilmente sedimentables. La floculación se refiere al proceso mediante el cual se desestabiliza el conglomerado actual de las partículas formando agregados más grandes, de modo que puedan ser separadas de las aguas residuales. La operación de coagulación-floculación se lleva a cabo para lograr la máxima eliminación de la DQO y sólidos suspendidos (se emplean productos químicos como los coagulantes - NaCl, Na₂SO₄ para facilitar la floculación)[26].

1.3.2 Unidad secundaria – Tratamiento secundario

La unidad secundaria tiene como objetivo central remover material orgánico, biodegradable y patógeno que pueda existir en las aguas a tratar, mediante operaciones biológicas con microorganismos, tales como operación biológica aerobia y la operación biológica anaerobia. Si bien, la industria agroalimentaria es la más apta para desarrollar este tipo de tratamientos, hay diferentes fases que ejecutan las operaciones esperadas para esta unidad, como: operación biológica aerobia y operación biológica anaerobia

- a) Operación biológica aerobia: Esta operación implica el uso de oxígeno libre o disuelto por microorganismos (aerobios), en la conversión de residuos orgánicos a biomasa y dióxido de carbono (CO₂). Este tipo de operación es de uso común en TARI orgánicas para lograr un alto grado de eficiencia, Dicha operación es adecuada para TARI de baja resistencia (concentraciones de DQO biodegradables menores a 1000 mg/L). Los sistemas aerobios logran una mayor eliminación de material biodegradable soluble en la materia orgánica, y la biomasa producida es generalmente bien floculada, lo cual reduce la concentración de sólidos suspendidos en el efluente [27].
- b) Operación biológica anaerobia: El proceso ocurre en ausencia de oxígeno, en donde la materia orgánica se descompone gracias a la acción de varios grupos de microorganismos (bacterias y arqueas), dando como producto

final biogás formado fundamentalmente por metano y dióxido de carbono. Los sistemas anaerobios son apropiados para TARI de alta resistencia (concentraciones de DQO biodegradable de más de 4.000 mg/L) [28]. El tratamiento anaerobio tiene como características fundamentales padecer de baja tasa de sedimentación, y crecimiento de microorganismos, inestabilidad de proceso y necesidad de tratamiento posterior del efluente anaerobio ya que este es nocivo y a menudo contiene ion amonio (NH_4^+) y sulfuro de hidrógeno (HS^-) [29].

1.3.3 Unidad terciaria – Tratamiento terciario

El propósito en el tratamiento terciario es refinar las características del agua, removiendo diminutas partículas de aceite libre y sólidos suspendidos totales permanentes en el agua, que se va hacia inyección o vertimiento. En la industria petrolera, se emplean procesos de aireación, se aplican tratamiento de fenoles y filtros de carbón activado, y se realizan ajustes finales de pH y corrosión. Asimismo, se recomienda el empleo de tecnologías como membranas, entre las que se encuentran la microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y la osmosis inversa (OI), para la remoción de macropartículas [30].

- a) Microfiltración (MF): La microfiltración es un proceso de filtración por medio de una membrana micro porosa que elimina contaminantes de un fluido, se emplean filtros del tamaño de micrómetros donde las dimensiones del poro de la membrana oscilan entre 0.1 y 1 micras. Se encuentran filtros a presión atmosférica, con fibras huecas, tubulares, entre otros. Este tipo de filtración no requiere de presión y no elimina los contaminantes sólidos disueltos. La microfiltración es utilizada en el tratamiento previo de la ósmosis inversa, la separación aceite/agua, tratamientos de efluentes y cualquier aplicación de agua de alta pureza [30].
- b) Ultrafiltración (UF): Esta tecnología de membranas es la más adecuada para retener sólidos en suspensión como materia coloidal y grandes moléculas orgánicas. A través de la membrana, se realiza un flujo poroso y viscoso de forma que su estructura física determinará el caudal de paso y el rechazo de partículas. El tamaño del poro se caracteriza por el corte de peso molecular que puede cruzar o no la membrana [31]. Las membranas de ultrafiltración tienen las siguientes características:

- El tamaño de los poros: 0,001 a 0,02 micrones
- Procesan aguas con concentración de sólidos.

- Material de fabricación: acetato de celulosa, PVC, poliacrilonitrilo, policarbonato y polisulfona.

La ultrafiltración tiene múltiples aplicaciones, que se aprovechan en etapas intermedias con el fin de disponer el flujo tratado a determinados equipos o etapas de proceso, de tal modo que cumplan actividades como:

- Separar ácidos húmico y fúlvico de agua destinada a alimentar una ósmosis inversa.
- Separar materia coloidal, orgánica de alto peso molecular y microorganismos, que no son separados por el intercambio iónico.
- Aplicaciones en las que no sea necesario separar materia disuelta [31].

c) Nanofiltración (NF): Es una tecnología de tratamiento físico, la cual es empleada comúnmente para TARI con concentración salina entre 200 mg/L – 5000 mg/L. Se recomienda hacer uso de esta tecnología como etapa intermedia entre ultrafiltración y ósmosis inversa [13]. También es utilizada para eliminar dureza, materias naturales orgánicas, y productos orgánicos sintéticos del agua [32]. Para aplicar esta clase de filtración se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Las membranas se pueden obstruir al ser utilizadas en situaciones donde se presenten aguas con abundantes materiales orgánicos.
- La nanofiltración produce grandes volúmenes de solución concentrada que debe ser eliminada apropiadamente.

d) Ósmosis Inversa (OI): es una etapa de operación, que busca el equilibrio entre dos fluidos. Si dos fluidos, que contienen diferente concentración de sólidos disueltos son puestos en contacto, estos se mezclarán hasta que la concentración sea uniforme. Cuando estos dos fluidos están separados por una membrana semipermeable (que deja pasar el fluido y no los sólidos disueltos), el fluido que contenga una menor concentración se moverá a través de la membrana hacia el fluido que contenga una mayor concentración de sólidos disueltos. Después de un tiempo, el nivel de agua será mayor a uno de los lados de la membrana (la diferencia en dicha altura de agua se denomina presión osmótica). Al aplicar en la columna del fluido, una presión superior a la presión osmótica, se obtiene el efecto inverso. Los fluidos son presionados de vuelta a través de la membrana, mientras que los sólidos disueltos permanecen en la columna [33].

Los procesos de filtración nombrados anteriormente actúan como complemento uno del otro, en diversas ocasiones se prefiere que el último proceso en entrar en funcionamiento sea la OI, ya que al pasar el fluido a tratar primero por MF, UF o NF se eliminan las partículas de tamaño más grande y el fluido entraría relativamente a una purificación, que daría como resultado un efluente con propiedades y características necesarias para el vertimiento o reutilización. Cabe resaltar, que el líquido a tratar debe pasar por operaciones previas (por ejemplo: operaciones de unidad primaria), las cuales se encarguen de eliminar partículas, que puedan dificultar la tarea de este tipo de tecnologías, ya que las membranas deben ser tratadas de manera adecuada para evitar suciedad, desgaste o envejecimiento prematuro.

Dentro del tratamiento terciario también se encuentran piscinas de canales y vertimiento, las cuales cumplen la función de oxigenar el agua que se dispone a inyección o vertimiento. Equipos como las torres de enfriamiento son empleados para disminuir la temperatura del agua resultante del tratamiento previo realizado.

Adicionalmente, el proceso para TARI genera lodos, los cuales deben ser tratados para reducir costos de manejo y disposición, por ende, es necesario realizar un proceso adecuado a este tipo de residuos, donde se utilizan tecnologías como: espesadores de lodos, lechos filtrantes, incineración y tratamiento con tierra nativa.

1.4 EQUIPOS EMPLEADOS EN SISTEMA TARI

La ejecución de cada una de las operaciones presentes en las unidades de tratamiento, se realiza a través de equipos especializados que cumplen a cabalidad con los requisitos necesarios. A continuación se expone un ejemplo de los más importantes y empleados por cada unidad presente en el proceso.

1.4.1 Unidad primaria

En la actualidad, la unidad primaria de tratamiento constituye la mayor parte de los componentes TARI, especialmente si los campos maduros desean darle una disposición fina de inyección al agua de producción. Los equipos más usados por dicha industria dentro de cada etapa son:

- a) Sedimentación: A nivel general se encuentran según su forma los siguientes tipos de sedimentadores:
 - Sedimentadores rectangular

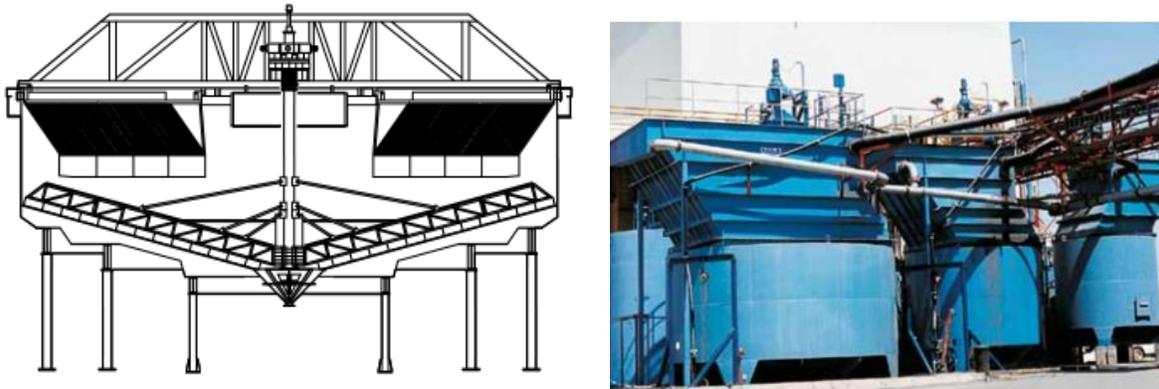
DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

- Sedimentadores lamelares
- Sedimentadores circulares

En el mercado internacional se encuentra el sedimentador de placas paralelas (IPS, por sus siglas en inglés) el cual trabaja bajo criterios básicos (claridad adecuada del líquido rebozado y máxima densidad de los sólidos evacuados) para equipos de decantación [34]. A continuación se brinda una breve explicación del funcionamiento y conformación de este equipo:

El IPS está formado por dos componentes principales: depósito superior, que contiene las placas lamelares, y el depósito de sedimentos inferior, de forma cónica o cilíndrica (ver figura 6). El IPS cumple con la tarea de clarificar el líquido separando los sólidos de este, una vez se logre la clarificación, los sólidos se asientan y descienden hacia un depósito donde siguen siendo tratados [34].

Figura 6 Sedimentador de Placas paralelas IPS.



Fuente: tomado de [34].

- b) Floculación: La operación es realizada en equipos de floculación, que se encargan de eliminar emulsiones, dispersiones y metales pesados de las aguas mediante la adición de coagulantes o floculantes [35]. Un ejemplo de este tipo de equipos es el siguiente:
- Floculador, tipo i-PFR: es un floculador de tubería, diseñado para la mezcla eficaz de los productos químicos, aguas residuales y también está conformado con un equipo de tubos especiales de mezcla (ver figura 7) [35].

Figura 7 Sistema de Floculación-Floculador tipo i-PFR.



Fuente: tomado de [35].

- c) Filtración: Para realizar la operación de filtración de aguas de producción a nivel industrial, se encuentran equipos que cumplen a cabalidad con el propósito de remoción de sólidos. La empresa GEDAR de Andalucía, España; provee filtros de arena utilizados en aguas con una carga de sólidos baja o media, que requieran una retención de partículas de hasta veinte micras (ver figura 8). Los sólidos en suspensión, que lleva el agua son retenidos durante su paso a través de un lecho de arena. Una vez se hallan acumulado los sedimentos, el filtro puede ser regenerado por lavado a contracorriente. Los filtros de arena se fabrican con Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio (PRVF), PA, entre otros. Las fabricaciones en metal, acero inoxidable o acero al carbono, se realizan para aplicaciones en las que se requiere una mayor resistencia a la presión [36].

Figura 8 Filtro de Arena de la empresa GEDAR.



Fuente: tomado de [36].

- d) Flotación: En este caso se exponen dos ejemplos de los equipos empleados en el proceso de flotación tanto IAF como DAF.

- IAF: El sistema está compuesto por un tanque de sección rectangular o circular por donde es conducido el líquido a tratar y forzado a atravesar una corriente de microburbujas de aire, que se adhieren a las partículas presentes llevándolas a la superficie. Los sólidos de peso específico mayor al agua, se sedimentan por gravedad en el fondo de la cámara. Posteriormente son retirados mediante un barredor superficial y otro de fondo. Las microburbujas son generadas por un aireador Zephyr™, el cual es ubicado fuera del líquido en la zona de alimentación de la cámara de separación con el motor de accionamiento, para generar microburbujas de entre 10 y 100 micrones de diámetro (ver figura 9).

Figura 9 Sistema de Flotación por Aire Inducido.



Fuente: tomado de [37].

- DAF: Dentro de este tipo de sistemas se encuentran los clarificadores DAF, que promueve la empresa ACS Medio Ambiente®. Este tipo de equipos se emplean para la separación eficiente de sólidos suspendidos, grasas, aceites y partículas flotantes. Su actividad se basa en el principio de funcionamiento de los sistemas IAF (ver figura 10) [38].

Figura 10 Clarificador DAF



Fuente: tomado de [38].

1.4.2 Unidad secundaria

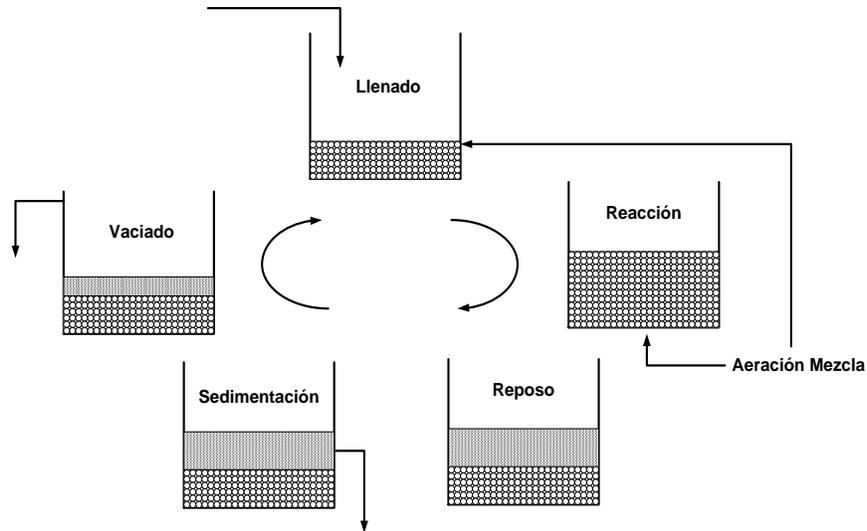
Para citar los equipos y/o máquinas de la unidad secundaria se deben precisar que el objetivo central es extraer material orgánico, biológico y patógeno de las aguas residuales. Si bien, la industria petrolera no ejecuta en muchos de sus pozos petroleros esta etapa del tratamiento, existen diferentes fases que han sido implementadas a través de operaciones por algunos de ellos y han mostrado resultados exitosos. Los equipos más representativos según sus operaciones de pertenencia son:

- a) Operación biológica aerobia: En los sistemas de depuración biológica, se encuentran reactores secuenciales de flujo discontinuo o también llamados reactores SBR. Un SBR es un sistema de crecimiento suspendido, en el que el agua residual se mezcla con un lodo biológico existente en un medio aireado [39]. El sistema SBR consta de, al menos, cuatro procesos cíclicos: llenado, reacción, decantación y vaciado, tanto de efluente como de lodos, (ver figura 11).
- Llenado: puede ser estático o dinámico. En el llenado estático se introduce el agua residual al sistema bajo condiciones estáticas. El llenado puede ser dinámico si se produce durante períodos de reacción.
 - Reacción: en esta segunda fase del ciclo, el agua residual es mezclada mecánicamente para eliminar las posibles espumas superficiales y preparar a los microorganismos para recibir oxígeno, puesto que se debe inyectar aire al sistema.

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

- Sedimentación: en este tercer ciclo, se genera condiciones de reposo en todo el tanque para que los lodos puedan decantar.
- Vaciado: durante esta fase, el agua tratada es retirada del tanque mediante un sistema de eliminación de sobrenadante superficial. Finalmente, se puede purgar el lodo generado para mantener constante la concentración de este [39].

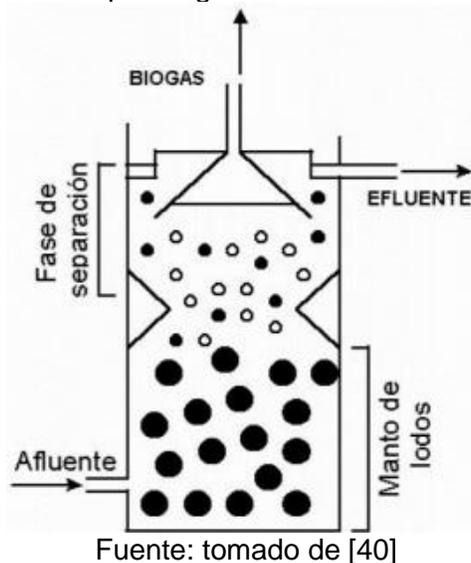
Figura 11 Etapas de un ciclo de operación de un reactor SBR.



Fuente: modificado de [39].

- b) Operación biológica anaerobia: Este tipo de proceso se puede llevar a cabo en reactores anaerobios de flujo ascendente (UASB). Esta tecnología es aplicada especialmente al tratamiento de aguas residuales con alto contenido de materia orgánica. La operación de los reactores UASB, se basa en la actividad autorregulada de diferentes grupos de bacterias, que degradan la materia orgánica y se desarrollan en forma interactiva, formando un lodo biológicamente activo en el reactor (ver figura 12). Dichos grupos bacterianos establecen relaciones simbióticas de alta eficiencia metabólica, bajo la forma de gránulos cuya densidad les permite sedimentar en el digestor [40].

Figura 12 Esquema general de un reactor UASB



1.5 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO TARI PARA INYECCIÓN Y/O VERTIMIENTO

El sistema de TARI empleado para inyección y/o vertimiento inicia con el tratamiento de sedimentación, puesto que tiene el objetivo de remover la mayor parte de partículas en suspensión y estabilizar la entrada de agua al proceso. La operación es realizada en tanques de estabilización [26]. Posteriormente, el agua es enviada a la operación de coagulación-floculación donde se remueve sólidos suspendidos y se disminuye la DQO en el agua. Esta operación se realiza a través de dos opciones: a) En un equipo especializado para esta actividad como los nombrados anteriormente; b) Al suministrar aditivos químicos al agua en tratamiento para ayudar a facilitar la hidrofobia del fluido.

Posteriormente el agua es enviada al equipo de flotación, que por medio de recirculación de agua e inyección de gas genera microburbujas, con el fin de remover aceites y sólidos restantes, estos son ubicados sobre la superficie del agua donde son removidos o reutilizados.

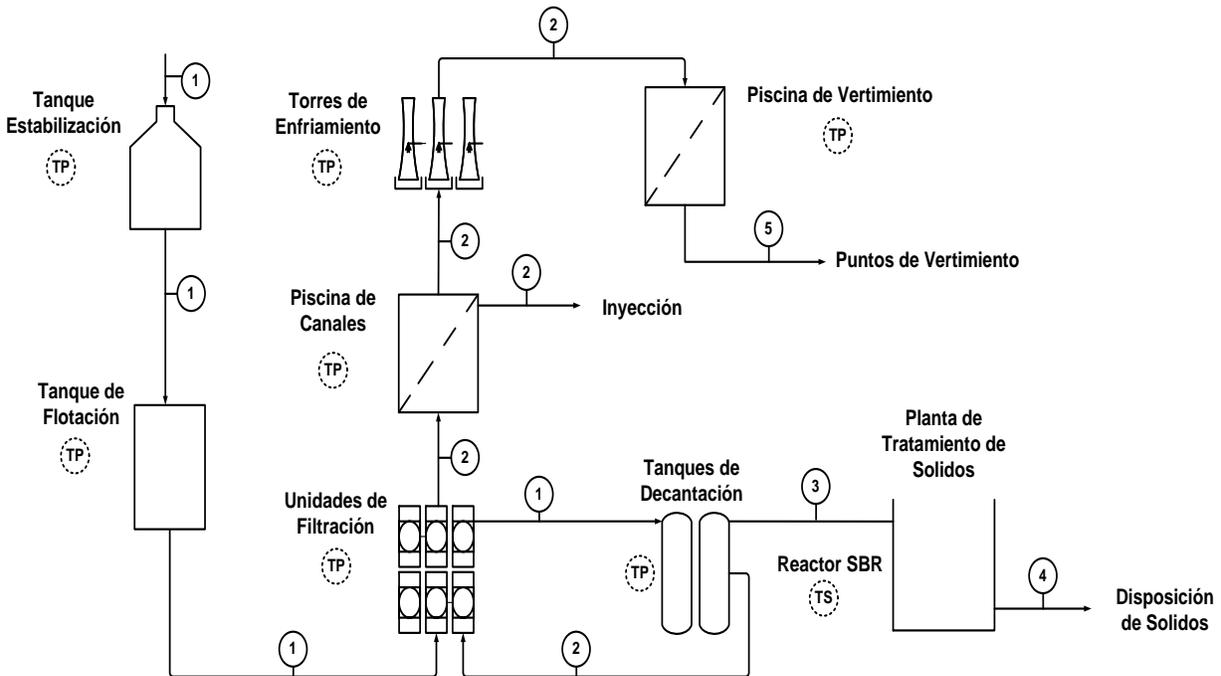
El agua continua su proceso de acondicionamiento y es transferida hacia las celdas de filtración, donde se retiene el poco aceite y sólidos aun presentes, garantizando la remoción casi total de los mismos. El agua, producto de esta operación, es direccionada hacia decantadores, en donde gracias a reacciones fisicoquímicas y un tiempo de reposo adecuado, se terminan de decantar los sólidos más pesados. Los aceites y sólidos livianos floculan y dan lugar a agua clarificada, que ingresa al ciclo nuevamente a través de las celdas de filtración, para posteriormente pasar por gravedad hacia piscinas de canales y ser dispuestas a inyección. Si por el contrario, el tratamiento tiene como objetivo vertimiento, el agua en proceso es transferida por bombas verticales hacia el sistema de torres de enfriamiento para reducir su temperatura, y luego salir por

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

gravidad hacia la piscina de vertimiento, en donde se oxigena y reduce aún más su temperatura. Finalmente, el fluido limpio es enviado con la ayuda de bombas verticales hacia los puntos de vertimiento escogidos [41].

Basándose en la información expuesta en el inicio del presente capítulo, se propone el diagrama de flujo general (ver figura 13), que corresponde al sistema genérico TARI en un campo petrolero.

Figura 13 Diagrama de flujo de proceso del TARI en un campo petrolero.



Fuente: propia, Septiembre 2015.

En el diseño del PFD se utilizaron etiquetas, como apoyo para señalar cada una de los flujos que circulan en el proceso y el tipo de tratamiento al que hace parte cada una de las operaciones (ver tabla 4).

Tabla 4 Etiquetas de apoyo para el diagrama de flujo de proceso del tratamiento de aguas de producción.

ID	DESCRIPCION	OPERACIÓN	TRATAMIENTO
1	Agua + Sólidos + Aceite	Estabilización	Primario (TP)
		Flotación	Primario (TP)
		Filtración	Primario (TP)
		Decantación	Primario (TP)
2	Agua	Piscina de Canales	Terciario (TT)
		Torre de Enfriamiento	Terciario (TT)
		Piscina de Vertimiento	Terciario (TT)

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

		Filtración	Primario (TP)
3	Solidos	Reactor SBR	Secundario (TS)
4	Solidos Tratados	Tratamiento de Solidos	Secundario (TS)
5	Agua para Vertimiento	Puntos de Vertimiento	

Fuente: propia, Septiembre 2015

En el proceso se presentan entradas y salidas de materia en cada una de las operaciones, en muchas ocasiones, estas variables podrían interpretarse como redundantes, sin embargo, las variables muestran diferentes porcentajes de cantidad durante el ciclo del proceso, que las hace diferentes (ver tabla 5).

Tabla 5 Entradas y salidas de materia en el proceso de tratamiento de aguas residuales industriales.

ENTRADAS	OPERACIONES	SALIDAS
Agua+ Sólidos + Aceite	Estabilización	Agua+ Sólidos + Aceite
Agua+ Sólidos + Aceite	Coagulación/Floculación	Agua+ Sólidos + Aceite
Agua+ Sólidos + Aceite	Flotación	Agua+ Sólidos + Aceite
Agua+ Sólidos + Aceite	Filtración	Agua+ Sólidos + Aceite
Agua+ Sólidos + Aceite	Decantación	Agua Sólidos
Agua	Oxigenación (piscina de canales)	Agua para Inyección Agua para Vertimiento
Agua (T >35°C)	Refrigeración	Agua para Vertimiento (35°C)
Agua para Vertimiento (35°C)	Oxigenación (piscina de vertimiento)	Agua para Vertimiento con propiedades adecuadas

Fuente: propia, Septiembre 2015

CAPITULO 2. PATENTE ECOFLOT

Resumen: *El presente capítulo hace referencia a la patente Ecoflot de la empresa Ecopetrol S.A., que tiene como objetivo sugerir la tecnología para la operación de flotación en el tratamiento primario de aguas residuales industriales. Adicionalmente, se aborda la patente desde diferentes aspectos, como: fundamentos fisicoquímicos, información técnica y dinámica general del sistema. Para concluir los conceptos teóricos, se realizan diagramas de flujo de proceso (PFD), y de instrumentación y tubería (P&ID).*

2.1 TARI EN EL CAMPO PETROLERO CANTAGALLO, BOLIVAR, COLOMBIA

El pozo petrolero ubicado en Cantagallo, es uno de los mayores campos productores del país. Está localizado en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, entre los departamentos de Santander y Bolívar; presenta un área total de 14 km² y fue descubierto en 1943 por la Compañía de Petróleos del Valle del Magdalena (ver figura 14). Actualmente, el campo comprende seis islas (Isla I, Isla II, Isla III, Isla IV, Isla V, Isla VI), ubicadas a lo largo de la cuenca del río Magdalena sobre los municipios de Puerto Wilches y Cantagallo, en donde se hallan equipos de producción y tratamiento de petróleo, además de su zona industrial (ver figura 15) [42][18].

La producción comercial del campo inició en 1952 y diez años más tarde alcanzó un desarrollo considerable, con una producción de 18.575 bopd [42]. Sin embargo, con el paso de los años, la cifra disminuyó considerablemente. No obstante, en el 2015 el campo Cantagallo alcanzó nuevamente una producción aproximada a los 20.000 bopd [43]. Cabe resaltar, que en el año 1995 Ecopetrol S.A. inició el proyecto piloto de reinyección de aguas residuales industriales, con el objetivo de eliminar vertimientos contaminantes al río Magdalena y cumplir con políticas gubernamentales acerca de conservación ambiental [42].

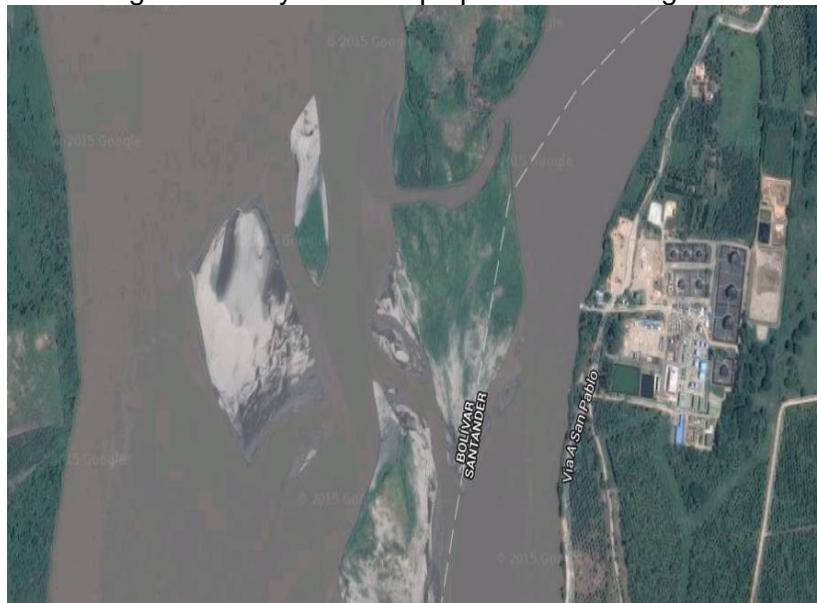
DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

Figura 14 Ubicación geográfica del campo Cantagallo - Bolívar



Fuente: tomado de [Google Maps].

Figura 15 Playa del campo petrolero Cantagallo.



Fuente: Tomado de [Google Maps].

2.1.1 Descripción del TARI implementado en Cantagallo, Bolívar, Colombia

La gran cantidad de agua asociada a la extracción y producción de petróleo, conlleva a desarrollar estrategias implementadas a través de procesos de separación y tratamiento del agua resultante, que permitan garantizar las características específicas requeridas para su disposición final: inyección o vertimiento. El agua residual industrial puede ser tratada y eliminada por varios métodos, algunos de los más importantes son: descarga controlada en aguas superficiales, descarga en ambientes marinos costeros, *inyección para mantenimiento de presión también conocido como recuperación secundaria* e inyección en pozos profundos [18].

La planta de tratamiento e inyección de aguas residuales del campo maduro Cantagallo, ejecuta el proceso de recuperación secundaria que permite mantener la presión de los pozos productores. Cabe resaltar que previo a este proceso, se debe realizar estudios al yacimiento para recibir inyección, ya que no todos los pozos son aptos para ello, y puede causar el abandono prematuro del campo, que trae como consecuencia grandes pérdidas económicas [18].

En la isla VI del campo Cantagallo, está ubicada la planta de tratamiento e inyección de aguas residuales industriales, la cual está conformada por equipos distribuidos en fases, que al agruparse dan lugar a operaciones de proceso de la unidad primaria (Tratamiento primario). La disposición de operaciones y unidad de operación dentro de la planta, se realiza teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas y geográficas del campo, debido a que estos parámetros son determinantes en las propiedades físico-químicas del crudo extraído y por ende del líquido a tratar. Como se estipuló en el primer capítulo de esta monografía, las unidades de operación pertenecen a los diferentes tratamientos existentes para el proceso de inyección [18]. Sin embargo, la planta de tratamiento dispuesta en Cantagallo solo presenta tratamiento primario, que enmarca las siguientes operaciones (ver figura 16):

- Estabilización
- Flotación
- Filtración
- Decantación

La planta TARI de la isla (VI) incluye, aunque de forma aislada, tratamiento de lodos (residuos obtenidos de cada una de las etapas presentes en el tratamiento primario).

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

Figura 16 TARI en la Isla VI del campo petrolero Cantagallo.



Fuente: Tomado de [44].

Las operaciones que componen el tratamiento primario de Cantagallo, se realizan para garantizar la calidad de agua a inyectar. Para ello, se fundamentan en procesos físico-químicos, como:

- Separación gravitacional
- Dispersión
- Coalescencia
- Sedimentación y Precipitación mecánica
- Flotación
- Filtración

La planta de tratamiento e inyección en cuestión, posee una capacidad nominal de 5000 Barriles de Agua Producida por Día (BWPD). Adicionalmente, cada operación realiza tareas específicas que contribuyen a disminuir los niveles de grasas y aceites, sólidos suspendidos y contenido de oxígeno, hasta lograr características específicas (ver tabla 6).

Tabla 6 Características del agua para inyección.

Parámetro	Cantidad
Sólidos Suspendidos	2.0 ppm
Tamaño sólidos Suspendidos	5 micrones
Oxígeno	<20 ppb
Grasas y aceites	Eliminación
Rata de corrosión	3 mpy

Fuente: tomado de [18].

A continuación, se explica la dinámica ejecutada en cada una de las operaciones presentes en el proceso.

- Operación de Estabilización

El tanque presente en esta operación está diseñado para emplear el tiempo necesario y estabilizar la entrada de agua a la planta. En esta operación, se lleva a cabo un primer proceso de separación de aceite y sólidos presentes en el agua para iniciar la disminución de la concentración de los contaminantes más densos [18].

Las corrientes de agua que entran al tanque, llegan por gravedad debido a que la planta se encuentra estratégicamente ubicada en un nivel más bajo respecto al piso de la planta de donde provienen los fluidos. Tras pasar el tiempo, el tanque descarga el fluido en proceso y lo envía a la operación de flotación, en donde continua el tratamiento. El drenaje de residuos que presenta el tanque es enviado a los lechos de secado, mientras que el aceite recuperado es enviado a la piscina API [18].

- Operación de Flotación

Esta operación comprende un sistema de Flotación, que está conformado por un subsistema interno encargado de generar microburbujas. A su vez, dicho sistema está conformado por una bomba de recirculación de agua tratada y una serie de arreglos de tuberías, que distribuyen el líquido a saturar con gas, y se acoplan a tuberías con los inyectores venturi; los cuales reciben una inyección de gas a través de tuberías flexibles provenientes del depósito de gas ubicado en la parte inferior del tanque [18]. Adicionalmente, el sistema presenta tuberías adicionales que conforman:

- Un distribuidor del líquido a tratar, encargado del suministro homogéneo del líquido tratado proveniente de la anterior operación (estabilización).
- Un subsistema de desborde para realizar el desnatado de los residuos extraídos del efluente tratado.

La patente que describe el tanque empleado en esta etapa tiene una capacidad de 100m³ a 1500m³. El sistema proporciona a la salida agua con menos de 5ppm en sólidos suspendidos. Finalmente, se realiza la descarga de agua a la operación de filtración. Los drenajes son enviados a los lechos de secado y el aceite recuperado se direcciona a las piscinas API [18].

- Operación de Filtración

En esta operación se retiene la mayor cantidad de aceite y sólidos presentes en el agua. Para cumplir con dicho objetivo, se emplea un filtro compuesto por lecho filtrante de tipo oleofilico, que a su vez, utiliza internamente un lecho de cascara de nuez y avellana. El filtro también cuenta con un sistema de retrolavado, que se encarga de remover partículas suspendidas y crudas presente en el equipo. Los residuos resultantes son enviados al decantador de sólidos [18].

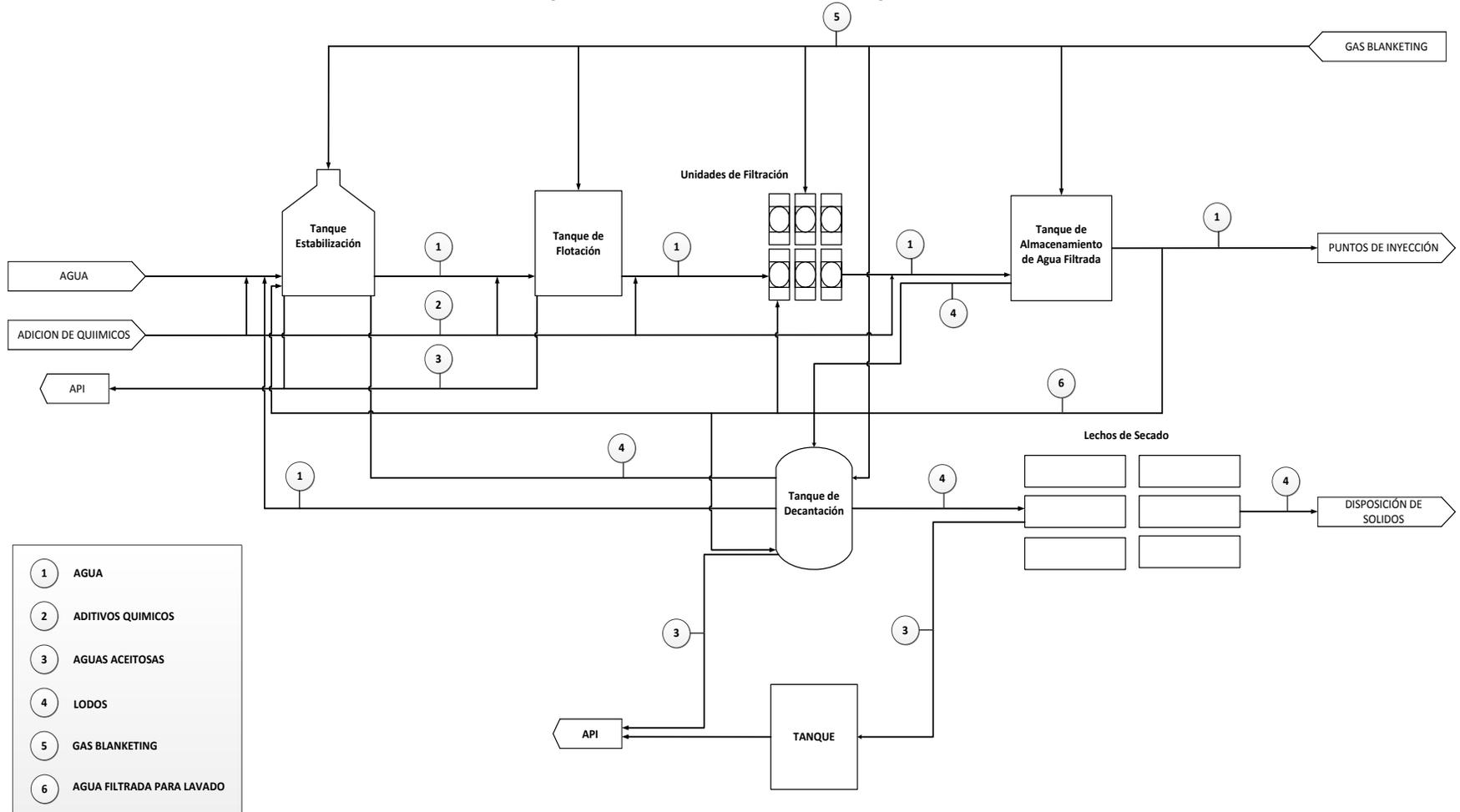
- Operación de Decantación

El decantador de sólidos utilizado recibe los lodos y crudos extraídos de la corriente de agua tratada en las operaciones anteriores. Esta operación tiene como función, almacenar y proporcionar el tiempo de asentamiento necesario para que los sólidos, agua y aceite se separen por diferencia de densidades. Después de homogenizar los lodos y crudos, son enviados a través de bombas hacia los lechos de secado y piscinas API, respectivamente. El agua resultante de esta operación es suministrada nuevamente a la operación de Estabilización [18].

Los lechos de secado cumplen la función de separar y secar los lodos, para ser biodegradados en un proceso posterior. El agua aceitosa resultante de este procedimiento, es enviada a un tanque de almacenamiento y posteriormente a la piscina API por medio de bombas verticales [18]. El proceso también cuenta con un tanque de almacenamiento de agua, ubicado después de la operación de filtración; el agua suministrada al tanque es enviada a los puntos de inyección y reutilizada para el lavado de los equipos presentes en las operaciones de filtración, estabilización y decantación [18]. Los equipos que conforman cada una de las operaciones funcionan con una capa de gas Blanket, que tiene como objetivo evitar que el agua de inyección entre en contacto con el oxígeno del aire. Adicionalmente, durante la operación se inyectan aditivos químicos para que el agua de inyección sea compatible con el agua de formación, y no se presenten daños en planta o yacimientos (ver imagen 17) [18].

Los flujos entrantes y salientes de cada una de las operaciones (ver tabla 8) que conforman el proceso TARI de Cantagallo, se representan mediante un PFD (ver figura 17).

Figura 17 PFD para TARI Cantagallo



Fuente: Modificado de [18].

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE COPETROL

En el diseño del PFD se utilizaron etiquetas, como apoyo para señalar cada una de los flujos que circulan en el proceso y el tipo de tratamiento al que hace parte cada una de las operaciones según lo expuesto en el primer capítulo (ver tabla 7).

Tabla 7 Etiquetas para el PFD del proceso de TARI en la isla VI de Cantagallo.

ID	DESCRIPCION	OPERACIÓN	TRATAMIENTO
1	Agua	Estabilización	Primario (TP)
		Flotación	Primario (TP)
		Filtración	Primario (TP)
		Almacenamiento de Agua	
		Decantación	Primario (TP)
2	Aditivos Químicos	Estabilización	Primario (TP)
		Flotación	Primario (TP)
		Filtración	Primario (TP)
		Almacenamiento de Agua	Primario (TP)
3	Aguas aceitosas	Estabilización	Primario (TP)
		Flotación	Primario (TP)
		Filtración	Primario (TP)
		Decantación	Primario (TP)
4	Lodos	Decantación	Primario (TP)
		Lechos de Secado	Tratamiento de Sólidos
5	Gas Blanketing	Estabilización	Primario (TP)
		Flotación	Primario (TP)
		Filtración	Primario (TP)
		Almacenamiento de Agua	Primario (TP)
		Decantación	Primario (TP)
6	Agua filtrada para lavado	Estabilización	Primario (TP)
		Filtración	Primario (TP)
		Almacenamiento de Agua	

Fuente: Fuente: propia, Octubre 2015.

En el proceso se presentan entradas y salidas de materia en cada una de las operaciones, en muchas ocasiones estas variables aparecen de manera reiterada, esto sucede porque las variables tanto de entrada y salida muestran diferentes porcentajes de cantidad durante el ciclo del proceso (ver tabla 8).

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPELROL

Tabla 8 Entradas y salidas de materia en el proceso de TARI en la isla VI del campo
Cantagallo

ENTRADAS	OPERACIONES	SALIDAS
Agua	Estabilización	Agua
Aditivos Químicos		Aguas Aceitosas
Agua Filtrada para lavado		Agua
Gas Blanketing		Aguas Aceitosas
Agua	Flotación	Agua
Aditivos Químicos		Aguas Aceitosas
Gas Blanketing		
Agua	Filtración	Agua
Aditivos Químicos		
Agua filtrada para lavado		
Lodos	Decantación	Lodos
Gas Blanketing		Aguas Aceitosas
Agua filtrada para lavado		
Agua	Almacenamiento	Agua
Aditivos Químicos		Lodos
Gas Blanketing		Agua filtrada para lavado
Lodos	Lechos de secado	Lodos
		Aguas Aceitosas

Fuente: Fuente: propia, Octubre 2015.

2.2 PATENTE ECOFLOT DE ECOPELROL IMPLEMENTADA EN CANTAGALLO

2.2.1 Descripción Ecoflot

La patente colombiana número WO 2010/067187 A1 denominada por la empresa Ecopetrol S. A. como Ecoflot fue presentada internacionalmente el 3 de diciembre de 2009 por sus inventores: Jorge Forero Sanabria Enrique, Javier Díaz Sierra, Olga Patricia Ortiz Cancino, José Javier Duque Osorio y Fredy Abelardo Nariño Remolina; con el título: *Sistema de generación de burbujas inmerso en un tanque de procesamiento de líquidos*.

a) Antecedentes

Tras varios años de estudios, los solicitantes de la patente desarrollaron metodologías que permitieron el diseño de una tecnología adecuada para la generación de microburbujas y así, implantar un sistema eficiente para la operación de flotación del tratamiento de aguas industriales de los campos de Ecopetrol. Inicialmente, los ingenieros a cargo adelantaron investigaciones en plantas pilotos y laboratorios, simulando condiciones físico químicas de los crudos de los campos con partículas sintéticas parecidas a las

reales del campo de Cantagallo, Bolívar. Posteriormente, Ecopetrol y el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) sintetizan los resultados y análisis de los mismos en un artículo denominado “DISEÑO DE UN NUEVO SISTEMA DE FLOTACIÓN PARA TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES” y publicado en diciembre de 1999 por la revista: Ciencia, Tecnología y Futuro (CT&F) [45]. La metodología enmarcada en dicho artículo, explica un nuevo diseño que mejora la operación de flotación implantando una combinación de técnicas: DAF y IAF; que permite un aumento en la eficiencia de generación de microburbujas empleadas para la separación de partículas pequeñas o en estado coloidal. Adicionalmente, los ingenieros en cuestión presentan análisis económicos y operativos de la nueva técnica desarrollada por medio de gráficas que evidencian una mejora en el desempeño global del sistema. Cuando se hace un paralelo entre los sistemas convencionales y el nuevo diseño, se observan cambios en componentes, por ejemplo, boquillas para inyección y difusión del gas en el fluido a tratar, eliminación de equipos para la generación de microburbujas que disminuyen el consumo energético del tanque de flotación, entre otros [45].

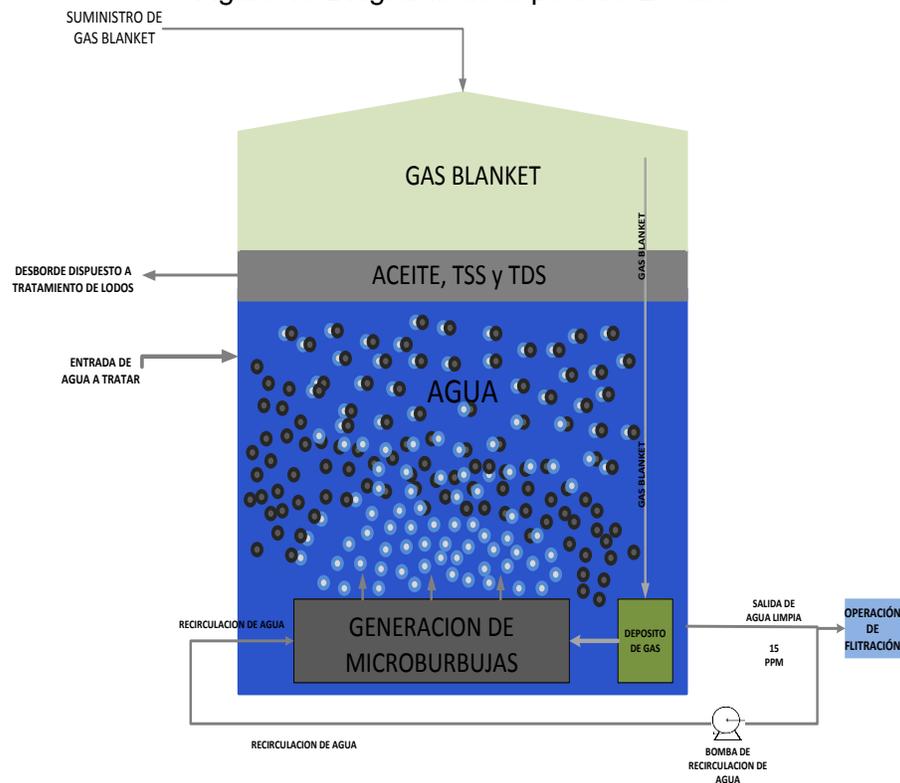
Posteriormente y tras varios años de investigación y pruebas en laboratorio, el 12 de octubre de 2007, Ecopetrol, el ICP y con la asesoría de la Universidad Industrial de Santander, publicaron un nuevo artículo denominado “DESIGN AND APPLICATION OF FLOTATION SYSTEMS FOR THE TREATMENT OF REINJECTED WATER IN A COLOMBIAN PETROLEUM FIELD” [46]. Este resume la implementación del nuevo sistema de flotación diseñado por Ecopetrol, en un campo petrolero colombiano (campo San Francisco). El documento atiende recomendaciones hechas en la experimentación en planta piloto, por ejemplo, diseño de un sistema flexible que trate eficientemente grandes volúmenes de líquidos y tendientes a crecer, mantener equilibrio entre operatividad y costos del sistema inmerso en el tanque, aumento en el rendimiento de la generación de microburbujas para cumplir con especificaciones vigentes de calidad de aguas producidas, entre otros [46].

Finalmente, la patente es una evolución de una serie de investigaciones y pruebas tanto en campo como en laboratorios realizadas por los ingenieros de Ecopetrol que pretende enfatizar en una de las operaciones de la etapa primaria del proceso de tratamiento, a un menor costo y con una alta eficiencia de remoción de partículas de tal forma que sea el punto de partida para reducir las etapas de tratamiento y alcanzar condiciones de salida menores a 5 ppm para agua producida.

b) Ecoflot

La patente Ecoflot de la empresa Ecopetrol pretende dar solución a uno de los aspectos críticos para la eficiencia de la operación de flotación en el tratamiento primario de aguas para inyección. El sistema comprende un subsistema interno que es el encargado de generar microburbujas y consiste en una bomba de recirculación del agua tratada, distribuidores acoplados a una serie de tuberías, tubos venturi para inyección de gas y aire, y cámara de gas. Adicionalmente, consta de tuberías para distribución del líquido a tratar y tubería de desborde para realizar el desnatado de aceites y sólidos tanto disueltos como suspendidos [7] (ver figura 18). Con dichos dispositivos primarios en funcionamiento que reúnen los conceptos de generación de microburbujas a través de aire disuelto y aire inducido, Ecoflot pretende disminuir las características del agua producida y dispuesta a tratamiento de 100 ppm (agua de entrada a flotación y proveniente de estabilización) a 15 ppm a la salida de la operación (agua dispuesta a la operación de filtración) [46].

Figura 18 Diagrama de la patente Ecoflot

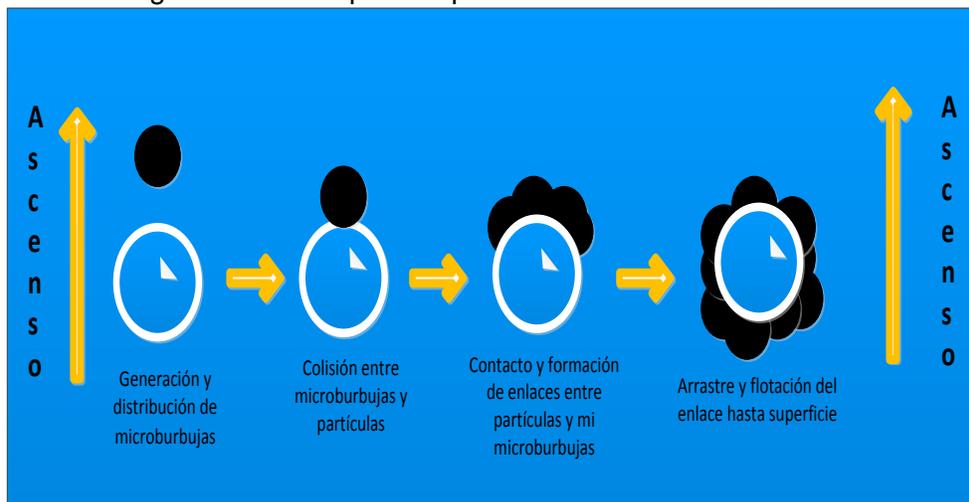


Fuente: modificado de [7].

c) Fundamentos de funcionamiento de la patente Ecoflot

La patente Ecoflot fue diseñada con el objetivo de mejorar la etapa de flotación en TARI de petróleo, y de esta forma, hacer más eficiente la separación gotas de aceite – agua. El proceso fenomenológico llevado a cabo en el interior de la patente puede describirse como: la dinámica de diferencia de densidades de dos sustancias, acelerado al saturar el agua a tratar con gas disuelto, a través de burbujas muy pequeñas (microburbujas), que forman enlaces de coalescencia con las gotas de aceite para ser finalmente arrastrados a la superficie [18]. Al detallar la etapa de flotación, se evidencian subetapas como: generación y distribución de microburbujas, colisión entre microburbujas y partículas, contacto y formación de enlaces entre partículas y microburbujas, arrastre y flotación de los enlaces hasta la superficie (ver figura 19) [45].

Figura 19 Subetapas del proceso de flotación de Ecoflot.



Fuente: Modificado de [10].

La eficiencia y buen funcionamiento del sistema de flotación depende, en gran parte, de las condiciones mecánicas de los fluidos: gas Blanket (inyectado a las tuberías venturi, que generan microburbujas en la parte inferior del tanque) y agua residual industrial (procedente de la etapa de estabilización). Claramente, no basta con generar microburbujas de un determinado tamaño; es necesario garantizar un régimen laminar tanto del gas Blanket; como del agua residual. Al existir un régimen suave y estable, las partículas (microburbujas - aceite) pueden sobrevivir hasta la superficie sin riesgo de explotar, dispersarse o mezclarse caóticamente con el fluido a tratar. Para ello, Osborne Reynolds demostró, que es posible

predecir dicho comportamiento laminar si existen datos, que permiten calcular un número adimensional y relacionar la velocidad, viscosidad y densidad con el diámetro del recipiente (siempre y cuando sea circular), a través de la expresión 1 [47]:

$$N_R = \frac{\rho V D_H}{\mu} \quad (1)$$

Dónde:

- N_R : número de Reynolds
- ρ : densidad del fluido a tratar
- V : velocidad característica del fluido
- D_H : diámetro circular para gas Blanket o diámetro de la columna de flotación
- μ : viscosidad dinámica del fluido

La generación de microburbujas constituye un factor fundamental para la eficiencia del proceso de flotación; entre menor sea el diámetro de las mismas, menor será su velocidad de ascenso y por ende, habrá mayor probabilidad de colisión y formación de enlaces, que sean capaces de subir hasta la superficie para el desnatado. Para justificar lo anterior, George G. Stokes demostró que para partículas de forma esférica, que se desplazan por fluidos viscosos y tienen la constante adimensional de Reynolds menor a 1.0 aproximadamente, existe una relación entre el coeficiente de arrastre a la superficie y el número de Reynolds, que permite calcular la dinámica de las burbujas en términos de velocidad, a través de la ecuación 2 [46][47]:

$$V = \frac{g (\rho_f - \rho_p)}{18 \mu} \quad (2)$$

Dónde:

- V : velocidad de ascenso de la partícula
- g : aceleración de la gravedad
- ρ_f : densidad del fluido
- ρ_p : densidad de la partícula suspendida
- D : diámetro de la partícula
- u : viscosidad del fluido

Se observa, que el criterio que puede modificar la ecuación para tener un mayor impacto, es el diámetro de la partícula (burbuja).

Adicionalmente, se concluye, que entre mayor sea la densidad de la partícula, menor será la velocidad de ascenso.

d) Descripción técnica y funcionamiento

El proceso de separación llevado a cabo en la tecnología Ecoflot, fue diseñado con apoyo del ICP como una alternativa para efectuar la etapa de flotación. El estado del arte de dicha etapa, resalta dos de las técnicas más importantes para ello: DAF e IAF. Sin embargo, los ingenieros a cargo de la patente, plantearon una combinación de ambas técnicas, empleando la eficiencia y dispersión de una pero la rentabilidad económica de la otra, respectivamente [18].

A continuación se listan las partes implementadas por los autores de la patente en Cantagallo, que componen y hacen posible el funcionamiento de Ecoflot (ver tabla 9).

Tabla 9 Partes del sistema Ecoflot.

Numero	Partes
(1)	Tanque
(2)	Distribuidor liquido
(3)	Distribuidor de líquido saturado con gas
(4)	Bomba de recirculación
(5)	Depósito de gas
(6)	Camara de gas del Tanque
(7)	Serie de tubos flexibles
(8)	Serie de inyectores tipo Venturi
(9)	Tuberías perforadas
(10)	Tubería
(11)	Distribuidor de Líquido saturados con burbujas
(12)	Tubería Principal
(13)	Derivaciones de la tubería principal
(14)	Tubería de Recirculación
(15)	Sistema Colector
(16)	Tubería de desborde
(17)	Tubería de desnate
(18)	Sistema de Desnate
(19)	Bomba de Suministro del agua de producción

Fuente: propia, Noviembre 2015.

La tecnología descrita en la patente consta de un tanque (1), que es el encargado de recibir y contener el agua residual a tratar proveniente de la etapa previa de estabilización. A una altura determinada, se encuentra el distribuidor de agua residual (2), que consiste en una tubería conectada a otras perforadas y generalmente de forma radial (entre 4 y 6 brazos), y distribuidas estratégicamente, para garantizar un riego uniforme y contacto homogéneo con las burbujas. En la parte inferior del tanque, se encuentra el distribuidor

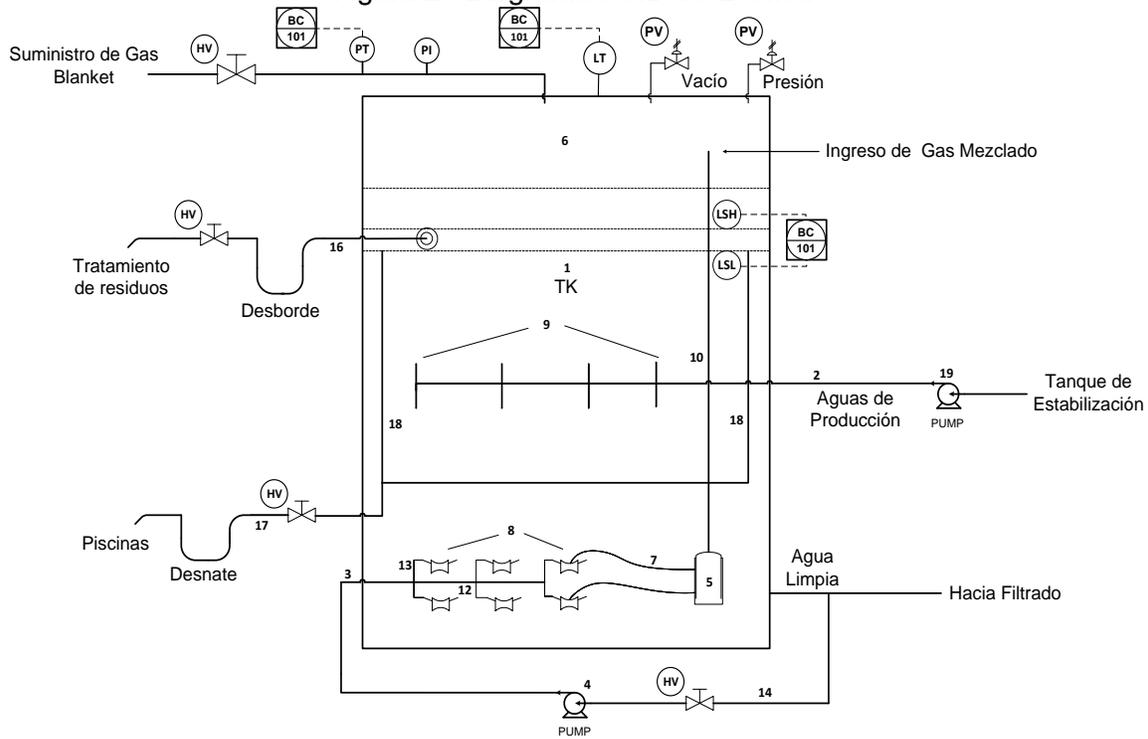
de líquido a saturar (3), que tiene la función de inyectar el agua recirculada tomada del mismo tanque a determinada presión, a través de una tubería principal conectada a tuberías flexibles, que distribuyen dicha agua a tubos venturi (8) para generar microburbujas. Los tubos venturi son conectados estratégicamente en derivaciones de tal forma que la caída de presión sea menor al 10% entre el primero y el último; y dependiendo de la configuración se pueden encontrar entre 2 y 6 por tramo. El distribuidor de líquido saturado por el gas es ejecutado por un sistema de recirculación, que toma el agua de la parte inferior del tanque y consta de una tubería (14) y una bomba (4) [7]. Adicionalmente, el tanque tiene un depósito de gas (5) en el extremo inferior derecho, que almacena gas proveniente de la cámara de gas (6) del mismo tanque. Dicho depósito, inyecta gas (presión constante) a los tubos venturi). La presión del gas Blanket inyectado a los tubos venturi y el fluido saturado debe ser suficiente para generar burbujas de $200\ \mu m$ y $300\ \mu m$, y una densidad de 0.5 a 1×10^4 burbujas por cm^3 de líquido saturado (ver figura 20) [7].

Las burbujas, que son generadas tras producirse un cambio de velocidad del fluido recirculado para inducir un vacío y hacer salir el gas Blanket mezclado en forma de diminutas burbujas del venturi, son distribuidas a través de boquillas de dispersión uniformes (11), para enlazarse con sólidos suspendidos muy pequeños o gotas de aceite, y ascender hasta la superficie del tanque a una determinada altura; en donde existe un sistema colector (15) dispuesto en el interior del tanque con tuberías, que forman trampas físicas por desborde para la salida de las partículas. El sistema consta de tuberías que descienden por las paredes del tanque y convergen en el fondo del mismo para la salida del material removido de la etapa (ver figura 20) [7].

Asimismo, la patente implantada en el campo Cantagallo consta de un control diferencial de nivel, que garantiza el desborde por colector de las partículas arrastradas a superficie. Además, el sistema cuenta con instrumentación detallada, que hace posible el funcionamiento y monitoreo de la etapa, tales como: indicadores, transmisores y válvulas de presión, transmisores de nivel, sensores de nivel y controlador lógico programables, que mantienen el set point del proceso (ver figura 20) [7].

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

Figura 20 Diagrama P&ID de Ecoflot.



Fuente: propia, Noviembre 2015.

En el P&ID se emplean etiquetas, que son establecidas en la norma ISA 5.1 y tienen el objetivo de identificar el tipo y función del dispositivo que hace parte del sistema (ver tabla 10).

Tabla 10 Etiquetas relacionadas al P&ID del sistema Ecoflot.

Tag.	Definición
PI	Indicador de Presión
PT	Transmisor de Presión
PV	Válvula de Presión
LT	Transmisor de Nivel
HV	Válvula Manual
LSH	Sensor de Nivel Alto
LSL	Sensor de Nivel Bajo
BC	Controlador Batch

Fuente: propia, Noviembre 2015

CAPITULO 3: ESCALAMIENTO Y DISEÑO DE PLANTA LABORATORIO ECOFLOT

Resumen: *El presente capítulo hace referencia al escalamiento de la patente Ecoflot, dejando como evidencia, el estado del arte de los métodos de escalamiento e insumos para aplicarlos; seguido de los criterios de selección, que permitan formular una propuesta metódica para dimensionar y validar el nuevo tanque Ecoflot. Para concluir el escalamiento y garantizar, que el nuevo sistema Ecoflot funcione, se diseñan y definen tuberías y parámetros internos propios de la patente.*

3.1. CONCEPTUALIZACION DE ESCALAMIENTO

Aproximadamente, desde la década de los años 50 se habla en ingeniería química de conceptos y metodologías para escalar procesos; aunque heurísticos, científicos han planteado sin mucho desarrollo, números adimensionales y factores determinantes para marcar tendencias repetitivas, que sugieran conceptos y pasos para una aproximación fundamental según el caso. Sin embargo, desde la década de los años 60, el estado del arte de escalamiento no muestra cambios significativos más allá del surgimiento de relaciones empíricas a partir de combinaciones de números adimensionales y datos históricos de cada proceso en particular [48] [49].

El escalado de procesos es una tarea indispensable para el diseño y operación normal de la planta, debido a que muchos detalles y resultados de producción se evidencian mejor en pequeña escala, pero se deben tener en cuenta para el diseño del proceso en escala real para garantizar una producción estable y rentable.

3.1.1 Definición de escalamiento

- *“Operación y puesta en marcha de manera exitosa de una unidad de tamaño comercial cuyo diseño y procedimientos de operación se basan, en parte, en experimentación y demostración a una escala más pequeña de operación” (Bisio y Kabel, 1985).*
- *“El escalado es el diseño y construcción de una unidad o conjunto de unidades de procesamiento a gran escala, en la cual se toman como base los cálculos y experimentos a pequeña escala” (Kossen, 1994).*
-

3.1.2. Marco teórico

De manera general, el escalamiento es definido como la instalación y operación de un equipo o proceso a escala industrial, para ello se desarrollan criterios y reglas de asignación numérica, que determinan unidades de medida de interés y arrojan estudios preliminares del proceso o equipo en cuestión [50]. En otras palabras, escalar un proceso es convertirlo de su escala de investigación (laboratorio o piloto) a escala industrial o viceversa en casos aislados.

Independiente del proceso que se desee escalar, el escalamiento se fundamenta en el principio de semejanza o similitud, el cual hace referencia a la relación entre sistemas físicos y su tamaño, cabe resaltar que un sistema físico está compuesto por tres cualidades principales: forma, tamaño y composición, en donde las tres son variables independientes. En términos prácticos, dos objetos pueden tener diferente tamaño y mantener las mismas cualidades físicas y de composición, a partir de este hecho el principio de similitud está relacionado con el concepto de forma [51]. En términos generales el principio de similitud establece que: la configuración espacial y temporal de un sistema físico está determinada por relaciones de magnitudes dentro del sistema y no dependen del tamaño ni de la naturaleza de las unidades en las cuales se miden esas magnitudes. Sin embargo, para que el principio de similitud asegure la semejanza de dos sistemas es necesario definir las configuraciones que se deben comparar. Estas son, geométrica, cinemática, dinámica, térmica, mecánica y química de los sistemas en cuestión [48].

Tradicionalmente, el escalado de procesos consiste en trasladar datos obtenidos en experimentaciones previas a una escala deseada; y aunque para ello, el diseñador es quien aporta la metodología practica para escalar según su criterio, existen algunos métodos para basar el desarrollo del escalamiento, tales como:

- a) Fenomenológico: es un método que tiene como base de postulación un análisis y razonamiento teórico microscópico. Sin embargo, no tiene en cuenta consideraciones moleculares pero si permite estimar rangos y puntos de operación desconocidos experimentalmente [50].
- b) Basado en modelos: es un método de escalamiento que tiene como insumo principal un modelo (expresado en ecuaciones matemáticas con fundamentos fisicoquímicos) muy aproximado del proceso real. Dicho modelo debe seguir fielmente el proceso y tener un grado de detalle, que proporcione un entendimiento total

del sistema para garantizar un buen escalamiento. Adicionalmente, el método basado en modelos tiene una parte aún más crítica, que consiste en validar el modelo para diferentes escalas alrededor de puntos de operaciones que permitan un régimen de operación deseado [48].

- c) Empírico: o método basado en la experiencia tiene como fundamento de diseño, registros históricos de operación del proceso en una escala existente. Para escalar, dichos datos deben relacionarse matemáticamente y producir correlaciones empíricas, que combinadas con otros métodos de escalamiento, permitan tener rangos y datos de operación de la nueva escala del proceso. Para basarse en este método, es necesario contar con una amplia cantidad de datos experimentales, que validen la estadística del sistema, sin embargo, si ocurre una perturbación o cambio significativo, la nueva escala no operara satisfactoriamente puesto que se fundamenta en datos obtenidos para condiciones específicas y restringidas de operación [48].
- d) Basado en Similitud: este método de escalamiento basado en el principio de similitud, busca mantener constantes los fenómenos que caracterizan el proceso de estudio por medio del uso de grupos adimensionales. En otros términos, este principio establece que: la configuración espacial y temporal de un sistema físico está determinada por las relaciones de las magnitudes dentro del propio sistema y no dependen del tamaño ni de la naturaleza de las unidades en las cuales se miden esas magnitudes [51].

Para realizar el método basado en similitud, se han establecido diferentes tipos de similitudes (configuraciones), empleados en la ingeniería química [41]. A continuación se explican brevemente:

- Similitud Geométrica: dos cuerpos son geoméricamente similares cuando para todo punto en el primer cuerpo existe un punto en el segundo. Es decir, las relaciones dimensionales correspondientes en cada sistema son iguales [48].
- Similitud Estática: cuerpos geoméricamente similares también lo son estáticamente cuando, al estar sujetos a esfuerzos

constantes, sus deformaciones relativas son tales que permanecen geoméricamente similares [48].

- Similitud Cinemática: Sistemas en movimiento geoméricamente similares presentan similitud cinemática cuando partículas correspondientes trazan trayectorias geométricas correspondientes en intervalos de tiempo similares (velocidades iguales en los puntos correspondientes en cada sistema) [48].
 - Similitud Dinámica: sistemas en movimiento con similitud geométrica son dinámicamente similares cuando las relaciones de todas las fuerzas correspondientes son iguales [48].
 - Similitud Mecánica: comprende las similitudes estática, cinemática y dinámica. Cada una de estas puede considerarse como una extensión del concepto de similitud geométrica en sistemas fijos o en movimiento, sujetos a fuerzas externas o internas [48].
 - Similitud Térmica: sistemas que presentan similitud geométrica son térmicamente similares cuando la diferencia de temperatura conserva una relación constante entre ellos y cuando los sistemas, si están en movimiento, son cinemáticamente similar [48].
 - Similitud Química: sistemas con similitud geométrica y térmica tienen similitud química cuando las diferencias correspondientes de concentración mantienen una relación constante entre uno y otro y cuando los sistemas, si están en movimiento, son cinemáticamente similares [48].
- e) Análisis Dimensional: es un método de escalamiento que combina diferentes cantidades físicas para dar origen a una formulación matemática, que describe un proceso (en Física, Química o Ingeniería) bajo cualquier sistema de dimensiones. A partir de este método, las expresiones matemáticas se representan en números adimensionales (en muchos casos ya establecidos) asociados a fenómenos fisicoquímicos, que se obtienen mediante una agrupación de variables y parámetros. Sin embargo, para

hacer análisis dimensional como método de escalamiento se debe garantizar cierta similitud geométrica entre escalas. En términos prácticos, el análisis dimensional construye hipótesis resultantes de relacionar dimensiones de fenómenos ocurridos en un proceso (físico, químico y/o biológico), con las ecuaciones asociadas al mismo. Dichas hipótesis puede ser verificadas experimentalmente [48] [51].

El análisis dimensional fue enunciado por Aimè Vaschy-a finales del siglo XVIV, pero fue Edgar Buckingham quien introdujo el teorema a comienzos del siglo XX bajo el nombre: *Teorema de π* [52]. Este establece que, en un problema físico en que intervengan magnitudes en las que hay m dimensiones fundamentales, las n magnitudes pueden agruparse en $n - m$ parámetros adimensionales [53].

En [48] se establece una metodología para desarrollar el análisis dimensional como método de escalamiento. A continuación se expone la metodología:

- Obtener las ecuaciones que representan el comportamiento del sistema de estudio.
- Volver adimensionales las ecuaciones dimensionales del modelo.
- Obtener los grupos adimensionales comunes, a partir de la aplicación del teorema π de Buckingham.
- Correlacionar los datos experimentales de la forma (3):

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}) \quad (3)$$

- Escalar usando el criterio de similitud, que garantiza una relación (4):

$$\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m} \quad (4)$$

Nótese, que las relaciones halladas deben ser idénticas tanto para el sistema a escalar como para el sistema escalado.

3.2. PROPUESTA METÓDICA PARA ESCALAR ECOFLOT

En la sección anterior, se mencionaron diferentes métodos propuestos para escalar, en la mayoría de casos, de piloto a industrial (de menor a mayor). Asimismo, se hizo énfasis en que el desarrollo de las metodologías empleadas para diseñar plantas o procesos en diferentes escalas tiene que ver, en gran porcentaje, con el criterio del diseñador y los parámetros específicos de cada caso de estudio. Por esta razón, aunque hay pautas para seguir ligeramente, los autores del presente trabajo han planteado una combinación de métodos, que permiten transportar datos de escala real a escala de laboratorio (escalamiento inverso), además de tener en cuenta las condiciones de trabajo propias de Ecoflot. Por tanto, la determinación de la propuesta para escalar abarca dos aspectos fundamentales:

- Criterios de selección para determinar método de escalamiento
- Propuesta metódica para escalamiento Ecoflot

A continuación, se describe cada uno de los aspectos mencionados anteriormente.

3.2.1. Criterios de selección para determinar métodos de escalamiento

Ecoflot está implementada en Cantagallo y actualmente está en operación como parte del TARI del campo. Como un factor importante a tener en cuenta para aprobar o descartar métodos de escalamiento (dentro de la propuesta metódica planteada por los autores), se destaca que Ecoflot no tiene tanque de respaldo para mantenimiento, por tanto el tanque opera continuamente desde 2009. No se permiten hacer pruebas, ni identificación, ni manipulación de alguna parte interna o externa del sistema. Así como, tampoco fue posible contar con alguna información y operación requerida de planta, distinta a la expuesta en el documento de la patente y algunos datos dimensionales de visita en campo del tutor del presente trabajo. Asimismo, es importante recordar, que Ecoflot pertenece a conocimiento privado de Copetrol, y por tanto la empresa protege la información relevante relacionada a dicha patente.

Teniendo en cuenta las condiciones anteriormente planteadas, que rodean a Ecoflot, se determinó el empleo o descarte de los métodos expuestos en el marco teórico del presente capítulo. A continuación, se explica cada uno:

- a) Fenomenológico: este método tiene como insumo principal detalles de operación a nivel microscópico, lo que lo hace complejo y difícil de implementar para este caso, debido a que se requiere información precisa y detallada a nivel micro de la planta.

El método de escalamiento Fenomenológico fue descartado, principalmente porque no se cuenta con la mínima cantidad de

información requerida para plantear la planta de laboratorio a través de dicho método.

- b) Basado en modelos: para basarse en este método se necesita información exacta y concisa del funcionamiento dinámico tanto interno como externo de la planta. Asimismo, aplicar este método exige tener conocimientos avanzados y de nivel experto en Mecánica de fluidos, Hidráulica, Termodinámica y Química.

El método de escalamiento basado en modelos se descartó como primera medida, porque los autores no contaban con la información específica requerida. Como segunda medida, adquirir los conocimientos avanzados en las áreas implicadas, exigía de un periodo de tiempo extenso, que sobredimensionaba el proyecto y sobrepasaba los alcances de tiempo del mismo. Adicionalmente se concluye, que no se puede escalar con base en el modelo porque aun a la fecha (28/03/2016), la comunidad científica no ha establecido leyes que describan el fenómeno de la flotación con microburbujas. Aunque existen teorías más acertadas que otras, los expertos en el tema siguen indagando para obtener modelos más próximos de los sucesos que implica la flotación [54].

Por otra parte, un plan de acción para utilizar el método basado en modelos, es obtener el comportamiento del sistema, al relacionar las variables de entrada y salida del mismo, a través de técnicas de identificación. Para capturar los valores de dichas entradas y salidas, es necesario experimentar y hacer pruebas en campo. Por tanto, el plan de acción se descartó, porque no fue posible ingresar al campo Cantagallo y hacer pruebas en Ecoflot.

- c) Empírico: la metodología del escalamiento basado en la experiencia, implica que el diseñador haya manipulado, el sistema en cuestión, por largos periodos de tiempo y por ende, tenga conocimiento pleno del diseño, partes y funcionamiento, de tal forma, que dicho conocimiento y le dé criterios de dimensionamiento para escalar y predecir comportamientos en otras escalas.

El método empírico fue descartado porque los autores no cuentan con suficiente conocimiento de partes, configuraciones y funcionamiento, así como tampoco, fue posible presenciar la puesta en marcha del sistema o manipularlo (está en

funcionamiento constantemente y no debe tener interrupciones o manipulaciones), para obtener experiencia en planta. De igual forma, no fue posible transmitir conocimiento de expertos en Ecoflot a los autores del presente trabajo.

- d) Basado en similitud: para aplicar esta metodología, los autores requieren información concisa de medidas, dimensiones, materiales de construcción, dinámica y funcionamiento general, que permitan representar el sistema en ecuaciones muy aproximadas al comportamiento real, con el fin de obtener números adimensionales de diferentes tipos (geométricos, cinemáticos, térmicos, dinámicos, entre otros), que permitan reproducir comportamientos puntuales en la planta escalada.

El método basado en similitud fue acogido como base de diseño de la propuesta metódica Ecoflot, porque los autores cuentan con algunos insumos requeridos para aplicar. Sin embargo, al faltar una gran parte de insumos primarios, se debe complementar el método basado en similitud con otro, en parte, para validar los resultados que arroje el criterio de similitud viable a aplicar.

- e) Análisis dimensional: para aplicar el método basado en análisis dimensional se necesita conocer generalidades de la dinámica del proceso en cuestión, además se requieren las variables y magnitudes físicas, que interfieran en dicha dinámica. Por ello, es importante tener criterios, que permitan establecer cuáles son las etapas o comportamientos indispensables a reproducir en el nuevo sistema.

El método basado en análisis dimensional fue acogido por los autores como parte de la propuesta metódica para escalamiento, porque se cuenta con los insumos y criterios mínimos requeridos de aplicación; adicionalmente, los datos existentes permiten asegurar la reproducción de fenómenos específicos indispensables para operación en el nuevo sistema.

3.2.2. Propuesta metódica para escalamiento Ecoflot

La propuesta metódica Ecoflot planteada por los autores para diseñar la planta de laboratorio, es el resultado de analizar las circunstancias anteriormente mencionadas (que rodean a la patente) y su relación con el

estado del arte de escalamiento. Para obtener un tanque con comportamientos muy aproximados a Ecoflot, se plantean tres fases fundamentales, con el fin de obtener un sistema a nivel de laboratorio proporcional y de comportamientos equivalentes. Dichas fases son:

- Fase 1: Elección y determinación de tanque Ecoflot real
- Fase 2: Escalamiento de tanque Ecoflot para planta de laboratorio
- Fase 3: Validación teórica del sistema Ecoflot para planta de laboratorio

A continuación, se determina y describe cada una.

a) Fase 1: Elección y determinación de tanque Ecoflot real

La fase 1 compone la raíz de la propuesta metódica de escalamiento porque tiene como objetivo, determinar el tanque (con dimensiones y parámetros de operación relevantes), que se va a escalar. En esta fase, se debe asegurar tener todas las medidas que componen al sistema modelo, así como todos los datos de operación para dichas medidas específicas, con el fin de garantizar, que la información base pertenezcan a un mismo sistema, y coincida con caudales y capacidades instaladas y/o útiles.

b) Fase 2: Escalamiento de tanque Ecoflot para planta de laboratorio

La fase 2 compone el escalamiento del tanque y debe arrojar como producto final todos los datos geométricos y dimensionales del tanque en su nueva escala. Para hacer el escalamiento de esta fase, se emplea del método basado en similitud, el criterio de similitud geométrica de la siguiente manera:

- Determine y/o suponga una primera medida del tanque a escala de laboratorio. escoja dicha medida según su conveniencia o criterios de diseño.
- Encuentre un primer número adimensional, que será el responsable de determinar la proporción de las medidas del tanque. Para ello, relacione la medida de la parte escogida del nuevo sistema (medida supuesta en el punto anterior), con su homónimo en Ecoflot. Dicha relación será la razón entre ambos sistemas y se llamara *Factor de escala* o *número adimensional de proporción* (ver ecuación 5)

$$\frac{\text{Medida modelo}}{\text{Medida prototipo}} = \alpha_1 \quad (5)$$

Dónde:

- *Medida modelo* = medida (homónima del prototipo) en tanque Ecoflot real
- *Medida prototipo* = medida supuesta del nuevo tanque Ecoflot laboratorio
- α_1 = Factor de escala o numero adimensional de proporción.

Nota: a partir de la relación 5, se llamara Ecoflot modelo al sistema real implementado en campo y Ecoflot prototipo al sistema escalado y propuesto para laboratorio.

- Relacione las dimensiones restantes de Ecoflot real con α_1 , para obtener las medidas restantes del prototipo.
- Si el diseñador encuentra diferentes subsistemas en el sistema real, se recomienda encontrar diferentes números adimensionales, que le permitan tener una aproximación más sana de la escala. Para ello, repita los pasos de la fase 2.

c) Fase 3: Validación teórica del nuevo sistema Ecoflot para planta de laboratorio

La fase 3 de la propuesta metódica compone la validación teórica del nuevo tanque con las medidas obtenidas en la fase 2; con el fin de garantizar la reproducción proporcional del fenómeno físico llevado a cabo en el interior del nuevo tanque. Para lograr dicho escalamiento físico, se encuentran números adimensionales basado en el teorema π de Vaschy y Buckingham, de la siguiente manera:

- Encuentre una relación de variables físicas que describa un comportamiento a repetir en el tanque prototipo.
- Determine cuantas y cuales variables físicas (n) interfieren en la relación anterior.

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE COPETROL

- Determinar las magnitudes fundamentales (m) de las variables físicas.
- Encontrar la cantidad de relaciones adimensionales ($\pi = n-m$) a reproducir en el nuevo tanque.
- Determinar cada π como se escribe en [53].
- Determinar si las relaciones adimensionales encontradas, que se deben reproducir idénticamente en el nuevo tanque, son números adimensionales ya establecidos (ver tabla 11) o determinados por otros autores.

Tabla 11 Números Adimensionales establecidos

Numero adimensional		Similitud aportada
Reynolds (Re)	$Re = \frac{\rho * v * d}{\mu}$	Mecánica
Euler (Eu)	$Eu = \frac{\Delta P}{\rho * v^2}$	Estática y Dinámica
Strouhal (St)	$St = \frac{L/v}{t}$	Química
Relación de Forma	L/d	Geométrica
Froude (Fr)	$Fr = \frac{v}{\sqrt{(g * L)}}$	Estática y Dinámica
Peclet (Pe)	$Pe = \frac{L * v}{D}$	Mecánica

Fuente. Fuente propia, abril 2016.

Dónde:

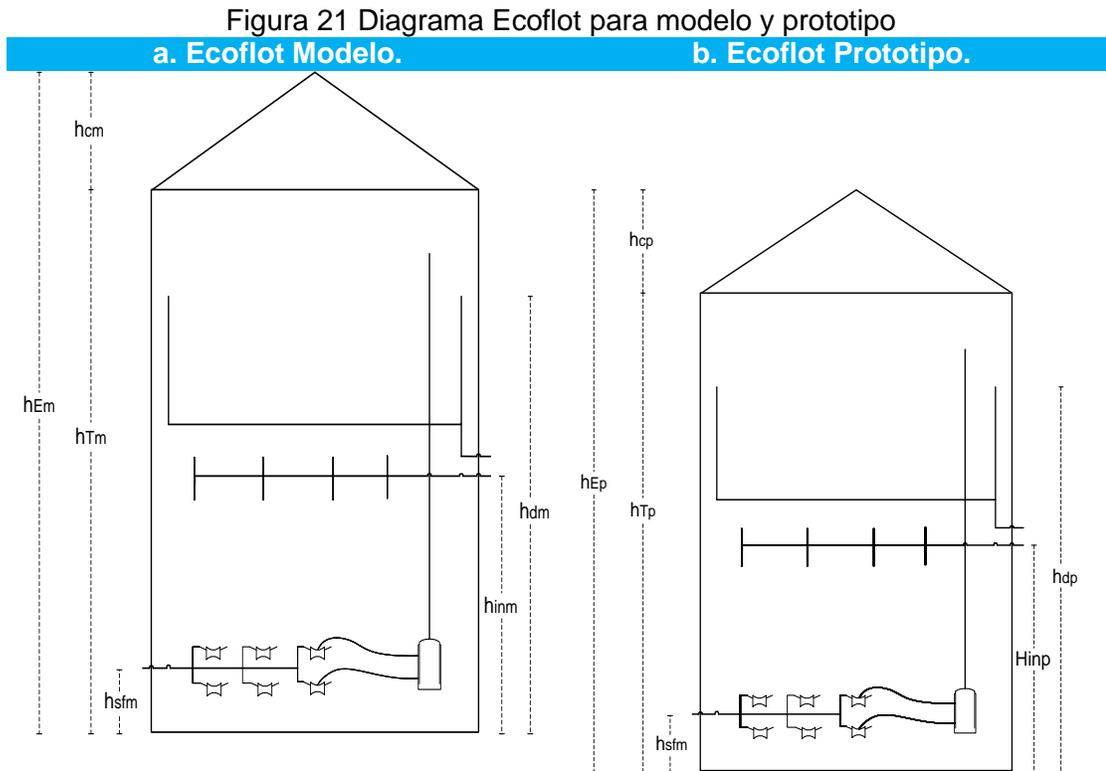
- ρ : Densidad
- μ : Viscosidad velocidad diámetro longitud
- ΔP : Diferencial de presión
- t : Tiempo
- g : Aceleración de la gravedad
- D : Difusividad másica

3.2.3 Resultados de la aplicación de la propuesta metódica Ecoflot para prototipo

La propuesta metódica Ecoflot sugerida por los autores, arroja como resultado únicamente el dimensionamiento del tanque, que puede ser corroborado siempre que se cumplan tanto para modelo como prototipo, dos relaciones adimensionales halladas a partir del teorema de π de Vaschy y Buckingham (para más información referente a la aplicación de la propuesta metódica planteada par Ecoflot, revisar Anexo B: propuesta metódica para escalar Ecoflot). A continuación, se muestran los resultados

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

de la propuesta y por tanto, las dimensiones de Ecoflot prototipo (ver Figura 21 y tabla 12):



Fuente: propia, abril de 2016.

Ecoflot modelo tiene una escala mucho mayor a Ecoflot prototipo. Dicha escala tiene una proporción de 1 a 163 veces aproximadamente. Por tanto, el procedimiento de la propuesta metódica es un escalamiento inverso, que tiene como resultado (ver tabla 12), un tanque pequeño y con dimensiones, que permite ser implementado en laboratorio.

Tabla 12. Resultados selección Ecoflot modelo y dimensionamiento Ecoflot prototipo.

Longitud		Modelo (m)	Factor de escala	Prototipo (m)
Nombre	Sigla			
Altura Ecoflot	h_E	8,87	5,3	1,7
Altura tanque	h_t	6,72	5,3	1,3
Altura cabezal	h_c	2,15	5,3	0,4
Altura desborde	h_{db}	5,65	5,3	1,1
Altura salida desborde	h_{outdb}	1,7	5,3	0,32
Altura sistema flotación	h_{sf}	0,86	5,3	0,16
Altura efectiva de flotación	h_{ef}	4,8	5,3	1,04
Altura entrada de agua a tratar	h_{in}	1,2	5,3	0,23

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

Altura tubería recirculación	h_{tr}	0,86	5,3	0,16
Altura salida de agua tratada	h_{out}	0,4	5,3	0,07
Altura de control del líquido	h_l	$h_{abm} + 5\text{ cm}$	5,3	1,2
Radio Ecoflot	r	5,05	5,3	0,9

Fuente: propia, abril 2016.

El último paso de la propuesta metódica, sugiere una validación teórica a través de la relación de dos números adimensionales compuesta de los parámetros característicos del agua a tratar, en función de la velocidad de ascenso descrita por Navier Stock. A continuación, se mencionan las dos relaciones (5) (6):

$$\pi_1 = \frac{V \rho D}{u} \quad (5)$$

$$\pi_2 = \frac{v^3 \rho}{u g} \quad (6)$$

Para concluir la propuesta metódica Ecoflot, se sugiere para la implementación, construir el prototipo con los datos exactos hallados (para información exacta y detalla de la aplicación de la propuesta metódica Ecoflot, ver anexo B) para garantizar se reproduzca la dinámica y fenómeno de Ecoflot modelo. Sin embargo, se sugiere complementar la propuesta, en la medida que se obtenga información relevante del proceso en campo.

3.3 DISEÑO ESTRUCTURAL DE ECOFLOT Y FUNCIONAMIENTO

Aunque el dimensionamiento del tanque fue descrito en la sección 3.2, no es información suficiente para visualizar Ecoflot prototipo. Por tanto, se hace importante proponer un diseño, que permita llevar a cabo el funcionamiento global en el que interfieran las entradas y salidas esperadas del tanque Ecoflot. Para ello, se deben tener en cuenta y aclarar las condiciones propias, que le permiten operar al prototipo.

3.3.1 Parámetros de operación Ecoflot

Tras el dimensionamiento del tanque Ecoflot, se obtienen datos adicionales, que sugieren parámetros de operación, tales como capacidades instaladas y útiles, aproximaciones de caudales de trabajo y valores de presiones de funcionamiento, especialmente para diseño. A continuación, se resumen parámetros de operación de Ecoflot (ver tabla 13).

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

Tabla 13 Parámetros de operación Ecoflot

Nombre	Unidades	Ecoflot Modelo	Ecoflot Prototipo
Capacidad Instalada del tanque	m^3	595,81	3,64
Caudal de trabajo	BWPD	35000	213,8
Caudal de trabajo	m^3/s	$64,4 \times 10^{-3}$	$3,9344 \times 10^{-4}$
Tiempo de flotación	s	598,87	74,8
Tiempo de flotación	mm:ss	9:58	1:15
Tiempo de residencia	s	7200	6734,04
Tiempo de residencia	hh:mm:ss	2:00	1:52:10
Presión de diseño de Inyección de gas	psi	-----	100
Presión de operación de inyección de gas	psi	40 – 80 psi	80
Densidad del agua a tratar	kg/m^3	949,8949	949,8949
Temperatura de agua a tratar	° F	120	120

Fuente: propia, marzo de 2016.

Nota 1: el caudal de trabajo del prototipo se determinó mediante una relación, entre la razón de la capacidad y caudal del modelo, y la capacidad del prototipo.

Nota 2: El tiempo de residencia se determinó mediante la siguiente ecuación (7):

$$t_r = \frac{h_{efp}}{\bar{v}} \quad (7)$$

Dónde:

- t_r = tiempo de residencia
- h_{efp} = altura efectiva de flotación del prototipo
- \bar{v} = velocidad media, en términos del caudal de trabajo y el área transversal del taque

Nótese, que la ecuación (7) garantiza que todo el caudal de trabajo del tanque prototipo transcurra por la altura efectiva de flotación.

Nota 3: La presión de diseño fue establecida por el criterio de los autores, teniendo en cuenta que el propósito de la planta de laboratorio es experimentar para mejorar el funcionamiento y la generación de microburbujas (directamente relacionada con la presión de inyección de gas).

3.3.2 Diseño estructural Ecoflot prototipo

Una vez determinadas las dimensiones y principales parámetros de operación de Ecoflot prototipo, es necesario establecer un procedimiento, que permita calcular parámetros de la estructura del sistema, en donde se garantice la operatividad y seguridad, teniendo en cuenta que es un tanque, que debe trabajar a diferentes presiones y con aguas contaminadas. Para realizar dichos cálculos, se organizan una serie de pasos teniendo en cuenta cada parte del sistema a tratar, como se muestra a continuación:

- Diseño del tanque
 - Fuerzas internas de Ecoflot prototipo
 - Tanque Ecoflot prototipo
- Diseño de tuberías
 - Tubería de suministro de agua a tratar
 - Tubería de recirculación de agua
 - Tubería de desnate
 - Tubería de suministro de gas

A continuación, se desarrolla el cálculo de los parámetros anteriormente mencionados.

a) Diseño del tanque

Dentro de las metodologías de diseño más apropiadas para tanques de diferentes utilidades en la industria petrolera, está la propuesta por la norma API 650, que trata el *diseño, montaje y construcción de tanques soldados en acero*, alrededor de cargas que afectaran al sistema, como: carga muerta (peso del tanque y tuberías), peso del líquido almacenado, prueba hidrostática (generalmente, encontrada en un simulador de elementos finitos), carga viva mínima del techo, presión interna, presión de prueba (encontrada en simulador de elementos finitos), presión externa y zona sísmica de construcción [55].

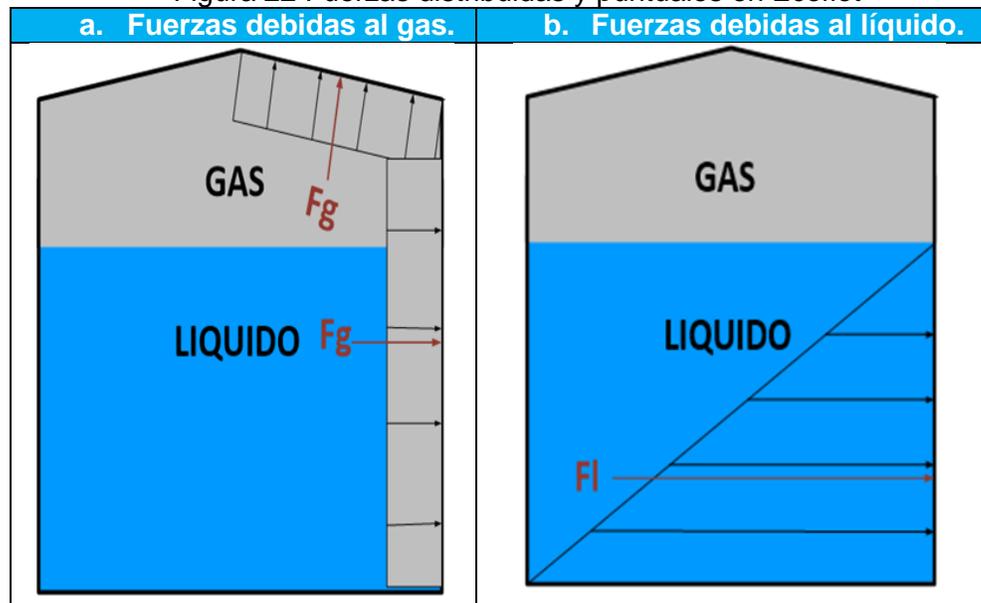
Adicionalmente, la norma API 650 propone parámetros de construcción ya establecidos, con base a las cargas encontradas del sistema. Sin embargo, el tanque Ecoflot prototipo no cuenta con las

dimensiones mínimas, que le permitan a los autores seguir las recomendaciones de diseño del estándar. Por otra parte, el estándar se descartó debido a que, el diseño propio del sistema (formas geométricas del tanque, diseño del tipo de techo, fondo y estructura a sostener como: montaje y/o obra civil), ya está establecido por los autores de la patente e implementado en Cantagallo [55]. No obstante, se complementa el diseño del tanque prototipo, con el fin de garantizar la seguridad y características de los materiales a emplear, independientemente del tamaño o sitio de implementación. Para ello, se analizan las fuerzas y esfuerzos de mayor magnitud en el tanque, como patrón para proponer el espesor de un material dado.

- Fuerzas internas de Ecoflot prototipo

El tanque Ecoflot experimenta diferentes fuerzas debidas a las presiones que lo caracterizan. La presión del gas sugiere una fuerza uniformemente distribuida, a través de todas las paredes del tanque (semejante a rectángulos). Sin embargo, la presión hidrostática o de líquido contenido, varía dependiendo de la altura y sugiere una fuerza distribuida, que aumenta en función de la altura (semejante a un triángulo), si se evalúa su efecto en el cuerpo del tanque (ver figura 22). Para análisis estructural, se analizan las fuerzas puntuales, que implica cada presión, localizadas en el centro de gravedad de la distribución [47].

Figura 22 Fuerzas distribuidas y puntuales en Ecoflot



Fuente: propia, abril 1026.

Nótese, que las fuerzas fueron analizadas para el techo y cuerpo del tanque. Por tanto puede concluirse, que el gas propicia una presión de igual magnitud en cada sección del tanque, sin embargo, el líquido genera una mayor presión a medida que tiene mayor profundidad. Desde otro punto de vista, se infiere que la mayor presión la experimenta el fondo del tanque. Por ello, la fuerza ejercida en la tapa inferior, indica el esfuerzo máximo, que debe soportar el material. A continuación, se calcula la fuerza en el fondo de Ecoflot (8):

$$F_{tf} = F_g + F_l \quad (8)$$

Dónde:

- F_{tf} = fuerza total del fondo
- F_g = fuerza debida al gas
- F_l = fuerza debida al liquido

Nota: para encontrar la magnitud de la fuerza total del fondo de Ecoflot, se toman los parámetros establecidos en la tabla 12.

$$F_g = P A \quad (9)$$

$$F_l = \rho g h_l \quad (10)$$

Dónde:

- P = presión para diseño del gas
- A = área del fondo del tanque
- ρ = densidad del líquido depositado en el tanque
- g = gravedad
- h_l = altura máxima del líquido depositado en el tanque

- Esfuerzo de trabajo del fondo Ecoflot

Una vez obtenida F_{tf} , se relaciona dicho esfuerzo de trabajo del fondo del tanque (Presión del fondo), con un esfuerzo de un material determinado por los autores (esfuerzo último del acero, $f_y = 420M Pa$) y un factor de seguridad (11). Sin embargo, el esfuerzo de trabajo del fondo del tanque debe relacionarse con una fracción de área del fondo dada en términos del grosor y diámetro de Ecoflot (12) [56]. A continuación, se expresa dicha relación: σ

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPELROL

$$\sigma_t \leq \frac{\sigma_{ultimo}}{F_s} \quad (11)$$

$$\sigma_t = \frac{F_{tf}}{A_{tf}} \quad (12)$$

Dónde:

- σ_t = esfuerzo de trabajo del fondo del tanque
- σ_{ultimo} = esfuerzo ultimo del material (Acero)
- F_s = factor de seguridad (propuesto por los autores, 3)
- A_{tf} = área de trabajo del fondo Ecoflot, en términos de:

$$A_{tf} = D_{E p} \text{ Espesor (e)}$$

Con los datos y parámetros obtenidos anteriormente, se cuantifica las relaciones de esfuerzos para determinar el espesor del tanque Ecoflot. Sin embargo, se desprecian las cargas muertas del tanque porque pueden ser hechas de distintos materiales y por ende va a variar su peso (Ver tabla 14).

Tabla 14 Especificaciones tanque Ecoflot prototipo

Nombre	Sigla	Material	Medida (m)
Espesor lamina Ecoflot	e	Acero	7

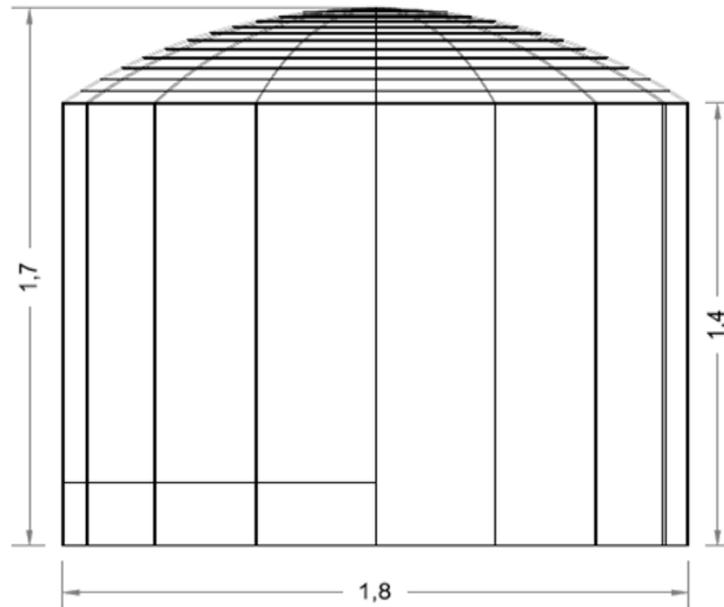
Fuente: propia, abril de 2016.

- Tanque Ecoflot

Una vez conocido el espesor que debe tener Ecoflot para evitar accidentes, las dimensiones arrojadas por la propuesta de escalamiento y la geometría del tanque, es posible una primera vista externa del tanque (ver figura 23).

Figura 23 Vista externa tanque Ecoflot (dimensiones en metros).

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE COPETROL



Fuente: propia, mayo de 2016.

b) Diseño de tuberías

El sistema Ecoflot cuenta con distintos arreglos de tuberías internos, que le permiten operar. Para garantizar su operatividad, los flujos que lo afectan deben ser laminares. A continuación, se diseña cada subsistema, teniendo en cuenta las condiciones y parámetros establecidos anteriormente (ver tabla 17):

- Tubería de suministro de agua a tratar

El agua a tratar entra por una tubería principal al tanque, ubicada a 0,23 m de la base. Al entrar hasta el centro del tanque, la tubería se divide en tuberías perforadas, que deben estar distribuidas uniformemente en el área transversal de Ecoflot, con el fin de distribuir uniformemente el agua residual [7].

Para diseñar cada tubería sugerida de Ecoflot, es necesario garantizar un régimen laminar (argumento capítulo II), que implica un número de Reynolds menor o igual a 2100 [47]. Sin embargo, la tubería o distribuidor principal permite (por diseño de los autores) pasar a través de sí, un régimen en transición (3700) debido a que posteriormente el caudal se divide en tuberías secundarias

que contribuyen a la disminución del número de Reynold dentro del tanque. A continuación, se determina el diámetro de la tubería principal:

Si:

$$\bar{V}_l = Q A \quad (13)$$

Dónde:

- \bar{V}_l = velocidad media del líquido a tratar.
- Q = caudal de ingreso del líquido a tratar al tanque.
- A = área transversal de la tubería principal de distribución de agua, en términos del diámetro de la tubería, así (14):

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (14)$$

Y, por criterio de diseño, se expresa el número de Reynolds como (15):

$$3700 = \frac{\rho D}{\mu} \bar{V}_l \quad (15)$$

Nota:

Entonces, es posible determinar el diámetro de la tubería principal, tras relacionar las ecuaciones 14 y 15; se obtiene (16):

$$D = \frac{4 \rho Q}{3700 \mu \pi} \quad (16)$$

La tubería principal surte a las tuberías distribuidoras internas en el tanque. Los autores proponen 4 tuberías distribuidoras o secundarias, con el fin de dividir el caudal del agua a tratar entre la mayor cantidad posible de tuberías, y disminuir el número de Reynolds notablemente para obtener un ingreso al tanque laminar. Para determinar el diámetro, se siguen los pasos de determinación del diámetro de la tubería principal, sin embargo, se propone un número de Reynolds de 1500.

Las tuberías secundarias parten del centro del tanque (fin de la tubería principal), hacia las paredes. Para determinar la longitud de cada tubería, se sigue la ecuación (17):

$$L_{ts} = \frac{D_{Ep} - D_s - 2D_{tsg} - D_c}{2} \quad (17)$$

Dónde:

- L_{ts} = longitud de tuberías secundarias o distribuidoras.
- D_{Ep} = diámetro Ecoflot prototipo.
- D_s = diámetro de seguridad
- $2D_{tsg}$ = diámetro de tuberías surtidoras de gas
- D_c = diámetro del codo, que une las tuberías secundarias con la principal.

Una vez determinada la longitud de cada tubería secundaria, se debe tener en cuenta como condición de diseño, el número y diámetro de los orificios por donde saldrá el caudal de agua a tratar. Para ello, se desprecian las pérdidas de energía por fricción, ya que la longitud de los brazos secundarios es relativamente pequeña. Para calcular dichos datos, se debe determinar la cantidad de agujeros. Si las 4 tuberías secundarias son simétricas, entonces se asume que el caudal entrante, se divide en cantidades iguales, y por lo tanto, el caudal a pasar por cada tubería secundaria es $\frac{1}{4}$ del entrante de agua (18). Ahora, se proponen 9 orificios por cada tubería secundaria y se determina el caudal de salida de cada orificio (19):

$$Q_{tsa} = Q_{ofc} \#Orificio \quad (18)$$

$$Q_{ofc} = \frac{Q_{tsa}}{\#Orificio} \quad (19)$$

Una vez determinado el caudal a pasar por cada orificio, se calcula el área permitente, con la teoría de gastos por orificio, para determinar el diámetro de cada oficio (20).

$$Q_{ofc} = C_d A_{ofc} \sqrt{\Delta P} \sqrt{\rho^{-1}} \quad (20)$$

Dónde:

- Q_{ofc} = caudal a pasar por cada orificio
- C_d = coeficiente de descarga (0,7)
- A_{ofc} = área de cada orificio

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE COPETROL

- ΔP = diferencia entre la presión aguas abajo y aguas arriba del orificio.
- ρ = densidad del fluido a pasar por el orificio

Si todos los valores se conocen excepto el área del orificio, es posible despejarla de (20), con el fin de encontrar el diámetro característico, que genera dicho caudal. A continuación, se determina el diámetro (22), teniendo en cuenta A_{ofc} (21):

$$A_{ofc} = \frac{Q_{ofc}}{C_d \sqrt{\Delta P} \sqrt{\rho^{-1}}} \quad (21)$$

Como el área de descarga es un orificio, se tiene el diámetro de una circunferencia en términos de su área:

$$D_{ofc} = \sqrt{\frac{4 A_{ofc}}{\pi}} \quad (22)$$

A continuación, se resumen los datos encontrados y aproximados a tuberías comerciales (ver tabla15).

Tabla 15 Dimensiones y parámetros de tubería de suministro de agua a tratar en Ecoflot prototipo

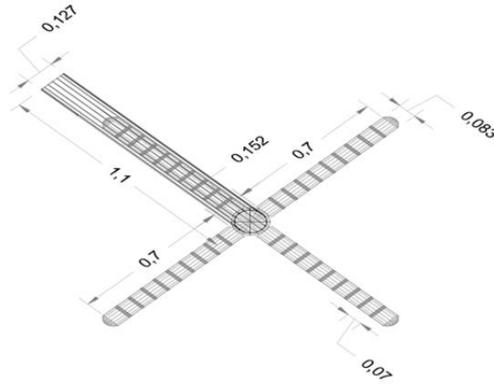
Nombre	Sigla	Medida 1	Medida 2
Diámetro de tubería principal de agua a tratar	D_{tpa}	12,7 m	5 in
Diámetro de tubería secundaria	D_{ts}	8,255 m	3,25 in
Longitud tubería secundaria	L_{ts}	69,6722 m	27,43 m
Caudal de cada tubería secundaria	Q_{tsa}	$9,836 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$	-----
# de orificios de cada tubería secundaria	# orificios	9	9
Caudal esperado por cada orificio	Q_{ofc}	$1,09 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$	-----
Diámetro de cada orificio	D_{ofc}	1,9843 mm	5/64 in

Fuente: propia, abril 2016.

La tubería de agua a tratar está diseñada para operar en el interior del tanque Ecoflot, con una entrada externa

proveniente de un tanque, de donde Ecoflot prototipo debe obtener el agua a ingresar. Sin embargo, es posible visualizar sus planos mecánicos desde el interior del tanque (ver figura 24).

Figura 24 Tubería primaria y secundaria de ingreso del agua a tratar en Ecoflot prototipo (dimensiones en metros).



Fuente: propia, mayo de 2016.

- Tubería de recirculación de agua

La tubería de recirculación ubicada a 0,16m, es la encargada de ingresar caudal suficiente y proveniente de Ecoflot, a los tubos venturi para garantizar la generación de microburbujas. Para ello, se propone una tubería principal de recirculación que ingresa hasta el centro del tanque, dos tuberías secundarias ubicadas simétricamente y desprendidas de la tubería principal, a través de un codo con un ensanchamiento y de 90°. Para determinar, los diámetros de cada tubería, se desarrollan los pasos mencionados en la tubería de entrada de agua, variando los caudales dependientes de las especificaciones del tubo venturi comercial a emplear (ver tabla 16).

Tabla 16 Especificaciones comerciales de tubo venturi usado para generación de burbujas Ecoflot prototipo.

Especificación técnica	Descripción	Figura 25 Venturi
Referencia	384	
Marca	Mazzei	
Tamaño (in)	½	
Diferencia de presión (psig)	5	
Caudal requerido (gpm)	0,7	

Fuente. [57]

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE COPETROL

Fuente: Modificado [57].

Una vez determinado el caudal de cada tubo venturi, se determina el caudal total a recircular y las dimensiones de las tuberías del subsistema. Para ello, se emplean los pasos de diseño de las tuberías de suministro de agua y se visualizan los resultados (ver tabla 17).

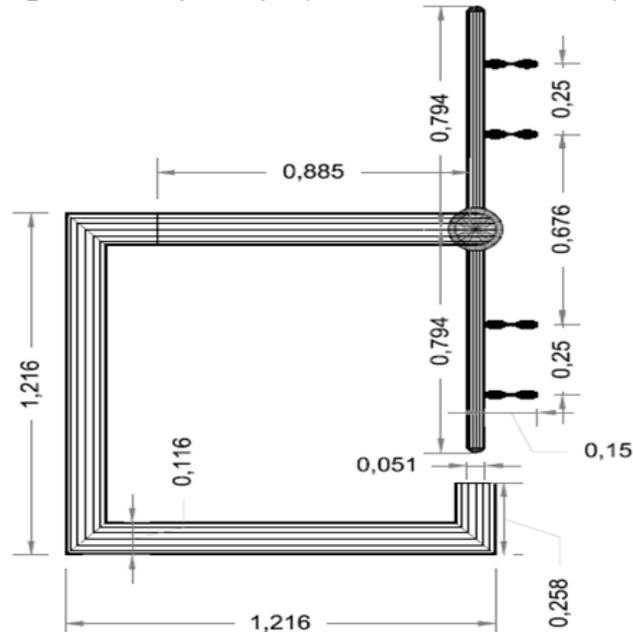
Tabla 17 Dimensiones de tubería de recirculación de agua para Ecoflot prototipo.

Nombre	Sigla	Longitud (m)	Longitud (in)
Diámetro tubería principal de recirculación de agua a tratar	D_{tpa}	10,16	4
Diámetro tubería secundaria de recirculación de agua a tratar	D_{ts}	5,08	2
Longitud tubería secundaria	L_{ts}	69,6722	27,43

Fuente: propia, abril de 2016.

La tubería principal de recirculación sale externamente del tanque e ingresa nuevamente hasta el centro del cilindro, para bifurcarse en las tuberías secundarias y soportar los tubos venturi (ver figura 26).

Figura 26 Tubería primaria y secundaria de recirculación de agua Ecoflot prototipo (dimensiones en metros).



Fuente: propia, mayo de 2016.

- Tuberías de desnate

El sistema de desnate es el encargado de evacuar el aceite y solidos suspendidos. Para lograr ese objetivo, se proponen dos tuberías internas, que generan un efecto sifón y evacuan la película formada en la superficie.

Para dimensionar las tuberías de desnate, se tiene en cuenta la concentración del agua de ingreso a Ecoflot, que aproximadamente es 80 ppm [18]. Posteriormente, se calcula el volumen que genera dicha concentración y se dimensiona la tubería comercial, que lo soporte. A continuación, se ilustra paso a paso el procedimiento, que comienza con la relación de concentración (23):

$$C_{ari} = \frac{m_a}{V_{Ep}} 10^6 \quad (23)$$

Dónde:

- C_{ari} = concentración del agua residual (ppm o mg/l) entrante a Ecoflot
- M_a = cantidad de aceite (mg) en el agua residual entrante a Ecoflot, en términos de densidad y volumen.
- V_{Ep} = volumen de agua residual presente en Ecoflot.

Si C_{ari} es conocido, es posible transformar la ecuación en términos del volumen de aceite y encontrar su valor. A continuación, se muestran los resultados obtenidos (ver tabla 18):

Tabla 18 Volumen de aceite requerido para 80 ppm

Nombre	Cantidad (cm^3)
Volumen de aceite para 80 ppm	$\cong 0,0003$

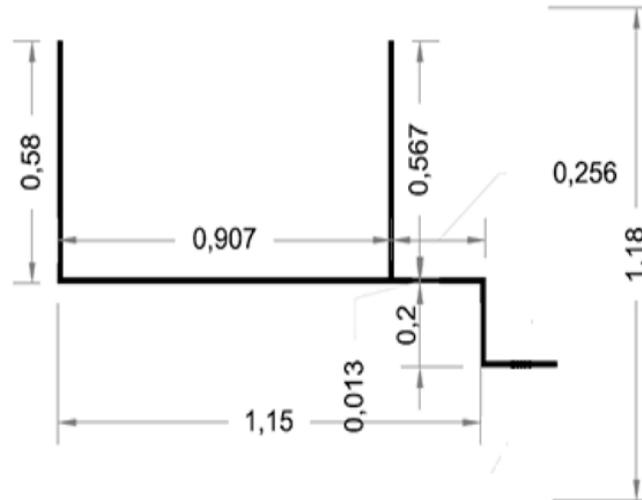
Fuente: propia, abril de 2016.

Nótese, que la cantidad de aceite es muy pequeña, y aunque por la tubería de desnate hay pérdidas de agua, el caudal esperado a pasar por ella es mínimo. Por tanto, se proponen dos tuberías (extremo superior de la tubería a una altura de 1,1m) de diámetro comercial de ½ in, unidas en el extremo

inferior, y a otra tubería que sale del tanque a 0,32 cm del fondo, y transfiere los residuos removidos a un depósito.

La tubería de desnate es interna en el tanque Ecoflot, sin embargo, tras unirse en el extremo inferior sale del tanque, con el propósito de transportar los residuos al exterior del tanque (ver figura 27).

Figura 27 Tubería de desnate Ecoflot prototipo (dimensiones en metros).



Fuente: propia, mayo de 2016.

- Tubería de suministro de gas.

En Ecoflot modelo hay dos tuberías surtidoras de gas, la primera bordea el cuerpo interno del tanque hasta alcanzar el ingreso de la tubería principal de recirculación para saturar con gas el líquido de recirculación. La segunda tubería bordea el cuerpo interno del tanque en el extremo opuesto a la primera, sin embargo, su objetivo es ingresar gas al estrechamiento de cada tubo venturi a través de tuberías flexibles. Dicho gas suministrado, se ubica en la parte superior del tanque, lo que se resume como un sistema, en donde, se visualizan dos fases: una gaseosa y una líquida.

Para Ecoflot prototipo, se propone solamente la segunda tubería surtidora de gas, ya que su función es primordial y está directamente relacionado con la eficiencia de generación de microburbujas. Sin embargo, el objetivo de la primera tubería no se evidencia claramente (en [45] [46], los autores de Ecoflot no mencionan la existencia ni utilidad de esta tubería)

por tanto, los autores proponen no agregarla a los diseños internos de prototipo. Si se analiza el efecto físico de saturar el líquido con gas, se concluye, que en la tubería de recirculación se formarían burbujas, como consecuencia de inyectar un gas a una presión determinada en un caudal de un flujo líquido [47], sin embargo, esas primeras burbujas producidas no son las determinantes en la eficiencia de remoción de la etapa de flotación.

Para calcular las dimensiones de la tubería de suministro de gas, es necesario conocer especificaciones o parámetros químicos del tipo de gas a inyectar (densidad, viscosidad dinámica o cinemática, temperatura). Posteriormente, se recomienda calcular (basándose en número de Reynolds para gases) el diámetro de la tubería, que garantice un flujo laminar, siguiendo los pasos de cálculo del diámetro de la tubería de ingreso de agua. Sin embargo, por efectos de diseño, los autores proponen una tubería con diámetro de 2 in, conectada en el extremo inferior a un depósito del cual se desprenden cuatro tuberías flexibles, cada una conectada a la garganta o estrechamiento de cada tubo venturi.

Nota 1: el diámetro de la tubería flexible debe ser tal, que permita encajar perfectamente al estrechamiento del venturi para garantizar, que no haya fugas de gas.

3.3.3 Funcionamiento de Ecoflot prototipo

Ecoflot prototipo es el resultado de dimensionar (a través de los pasos de la propuesta metódica) el tanque y comportamiento de Ecoflot modelo en una escala mucho menor. Aunque Ecoflot modelo está implementado en Cantagallo, hay muchos aspectos y actividades ejecutadas al interior del tanque, que la patente no esclarece. Por ello, los autores proponen condiciones y dinámica de operación por lotes:

a) Condiciones de operación

A continuación se describen las condiciones, que se deben garantizar para iniciar el proceso en Ecoflot prototipo:

- Para garantizar la operatividad del proceso interno Ecoflot es necesario, que el tanque, y las entradas y salidas del tanque, sean totalmente herméticas, con el objetivo de

aislar completamente el proceso de la presión atmosférica, y pueda ser gobernado por presiones manométricas.

- Para evitar posibles reacciones químicas, que alteren la base fenomenológica de Ecoflot, es necesario garantizar un vacío en el tanque y por tanto, en todas las tuberías y/o depósitos que se conectan al sistema.
- Como Ecoflot prototipo es una propuesta a escala de Ecoflot modelo, se debe asegurar ingresar el agua a tratar con las mismas condiciones de Ecoflot modelo - Cantagallo. Para ello, se debe asegurar una concentración aproximada a 80 ppm, lo que equivale a $0,0003 \text{ cm}^3$ de crudo por cada $3,64 \text{ m}^3$ de agua natural.

Nota 1: como la cantidad de aceite para lograr la concentración requerida es muy pequeña y difícil de medir, se aproxima la proporción a 1 gota por cada $3,64 \text{ m}^3$.

Nota 2: el agua a tratar debe entrar con una temperatura entre 45°C y 50°C

- Se debe garantizar que las tuberías de desnate puedan cerrarse y abrirse. Antes de iniciar la operación de Ecoflot, las tuberías de desnate deben estar cerradas para evitar perder caudal.

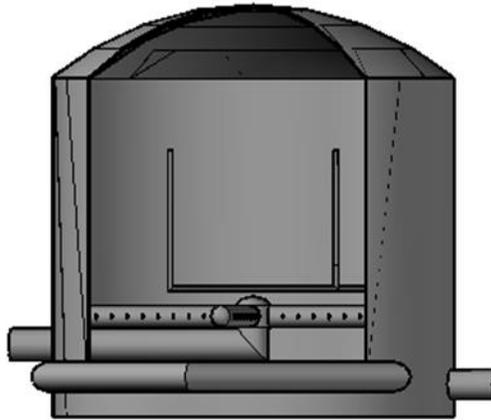
b) Operación Ecoflot

Una vez cumplidas las condiciones de operación, se puede poner en marcha el tanque Ecoflot. Para iniciar, por la tubería principal de suministro de agua, pasa el líquido a tratar con un caudal de $3,9344 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ con el fin de ser distribuido uniformemente a través de las 4 tuberías secundarias y los 9 orificios de cada una. El líquido solo ingresa al tanque hasta alcanzar un nivel de 1,2 m. Posteriormente, se ingresa gas tipo Blanket para lograr una presión interna de 80 psi (opcional y sujeto a cambios por experimentación). Cuando el manómetro indique 80 psi, se debe iniciar la recirculación del caudal, que pasa por la tubería principal de recirculación y las 2 secundarias conectadas a cada extremo de los 4 tubos venturis. Dicho caudal de recirculación debe ingresar con una presión mayor a 80 psi (o presión determinada para experimentación), aproximadamente 85 psi para lograr un $\Delta P \cong 5 \text{ psi}$ y garantizar, que el caudal de recirculación pueda entrar a la tubería. Tras la recirculación, empieza la generación de microburbujas, que son el resultado de circular el caudal requerido por cada venturi para lograr una caída de presión en su estrechamiento, que succione gas a

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

A continuación, se expone una perspectiva más clara de la distribución de las tuberías en Ecoflot prototipo (ver figura 29).

Figura 29 Vista lateral 3D Ecoflot prototipo



Fuente: propia, mayo 2016.

Nótese, que Ecoflot prototipo es un sistema diseñado geométricamente a escala, que reproduce el ascenso de burbujas de forma aproximada a Ecoflot modelo, siempre que se conserve el mismo valor de las relaciones adimensionales halladas a partir del teorema de π . Adicionalmente, es un sistema con una serie de tuberías internas diseñadas para mantener regímenes laminares y/o condiciones, que permitan reproducir la dinámica de Ecoflot modelo.

CAPITULO 4: PLANTA DE LABORATORIO ECOFLOT PROTOTIPO

Resumen: El cuarto capítulo hace referencia a las condiciones de operación, que se deben garantizar para el funcionamiento de Ecoflot prototipo. Para ello, se diseñó una planta de funcionamiento Ecoflot para laboratorio, que consiste en tres etapas fundamentales. La primera es la configuración de Ecoflot prototipo para proceso en lotes o continuo y las dos etapas restantes (Recepción – Mezclado y Flotación) enmarcan el proceso de limpieza de aguas. Asimismo, se determina el proceso de una forma clara y ordenada (Norma ISA 88), dinámica de las materias primas e insumos (PFD) e instrumentación y vista en planta (P&ID). Para concluir, con la ayuda de una herramienta computacional, se simuló el comportamiento global de entradas y salidas de la planta.

4.1 ECOFLOT PROTOTIPO

Ecoflot prototipo hace referencia a un tanque escalado inversamente, compuesto de una serie de tuberías y accesorios internos, que generan burbujas de ciertos tamaños capaces de enlazarse con partículas de crudo, con el objetivo de llevarlas hasta la superficie del líquido. Dicho prototipo se escaló, para que funcione proporcionalmente al modelo, lo que implica la reproducción de los mismos comportamientos físicos. Para ello, es fundamental que muchas de las propiedades químicas (densidad, peso específico, viscosidad), que interfieren con los fenómenos internos del prototipo, se reproduzcan tal cual. Por tanto, dichas condiciones sugieren diseñar una planta de laboratorio, que simule las condiciones de campo Ecoflot, sin embargo, debe acarrear ventajas como el tamaño, costos de producción, portabilidad y principalmente debe permitir experimentar a futuros investigadores, con alternativas de operación.

El prototipo Ecoflot requiere para su funcionamiento ciertas condiciones concretas, que le permiten operar (ver capítulo 3, parte 3.3.3.). Por tanto, se identifican entradas y salidas del tanque, como un primer insumo para el diseño de la planta (ver figura 30 y tabla 19).

Figura 30 Diagrama de entradas y salidas de Ecoflot prototipo



Fuente: propia, mayo de 2016.

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE COPETROL

Tabla 19 Parámetros de entradas y salidas de Ecoflot prototipo

Entrada	Descripción	Valor	Salida	Descripción	Valor
1	Caudal de agua a tratar	$3,9344 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$	1	Agua tratada	$\sim 3\text{m}^3$ - Perdidas de agua por desnatado
2	Gas Blanket	80 Psi	2	Aceite desnatado	~ 1 gota
3	Agua para recirculación	$1,76653 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$	3	Agua en proceso de tratamiento	$1,76653 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: propia, mayo 2016.

Nótese, que conocer las cantidades de las entradas y salidas no es suficiente para iniciar la dinámica interna de Ecoflot prototipo. Para ello, se deben garantizar simular condiciones de Ecoflot modelo, tales como:

- **Concentración:** Aunque el valor del agua a tratar ingresada a Ecoflot modelo es de 80 ppm, para Ecoflot prototipo, se recomienda una concentración mayor para facilitar la obtención de la mezcla que emule las aguas residuales propias de Cantagallo. Por tanto, se sugiere mezclar 1 gota de crudo (extraído en Cantagallo) con $3,64 \text{ m}^3$ (ver capítulo 3, condiciones de operación Ecoflot prototipo).
- **Temperatura:** Aunque puede variar para las aguas residuales dependiendo de la zona de extracción de crudo, se sugiere una temperatura aproximada de 50°C , que es la reportada por Cantagallo (ver capítulo 3, condiciones de operación Ecoflot prototipo).

Asimismo, nótese que el tanque tiene salidas (aceite desnatado y agua tratada), que se deben evacuar en un tiempo determinado del tanque para cumplir con el objetivo de limpieza y por ende medir la calidad del agua saliente. Por tanto, se asume Ecoflot prototipo como un sistema compuesto por cinco etapas, que al integrarse conforman la operación de flotación del tratamiento de aguas primario para una planta de experimentación de laboratorio. A continuación, se identifican las etapas (E) dentro de cinco unidades fundamentales:

- **E1:** una unidad de recepción de insumos, en donde se abastece e inspecciona la materia prima e insumos, que da origen a una mezcla aproximada a la de Cantagallo.
- **E2:** una unidad de mezcla y calefacción, que permita unir insumos y elevar su temperatura hasta a 50°C o 122°F .
- **E3:** una unidad de flotación, en donde ingrese la mezcla (producto de E1) a la temperatura dada (E2) hasta una altura determinada; ingrese el gas a cierta presión, dicho gas alimenta tubos venturi para generar burbujas de un

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE COPETROL

tamaño dado, que se enlazan con gotas de aceite hasta la superficie para ser desnatados.

- E4: una unidad de recepción de residuos, que transporte y almacene la capa de residuos (remoción E3) de crudo.
- E5: una unidad de depósito, que permita la salida del agua tratada proveniente de E3 y cierre el ciclo de la operación de flotación.

Nota 1: la planta de Ecoflot prototipo ilustra el proceso de flotación del tratamiento primario de un sistema TARI para petróleo.

Nota 2: aunque en el capítulo 2 se mencionó un sistema TARI con múltiples operaciones implementado en Cantagallo, para la planta de laboratorio se omitieron todas las etapas anteriores y posteriores a la flotación. Por ejemplo, para omitir la primera etapa de estabilización y sedimentación del TARI Cantagallo (en donde se reduce por primera vez la concentración de residuos en el agua), se determinó el volumen de crudo, que generara una concentración aproximada a la que tiene el agua saliente de dicha operación. Las operaciones posteriores se omitieron como consecuencia del propósito de diseño de la planta: experimentación Ecoflot.

Nota 3: aunque no se tiene información precisa del tipo de producción de la planta TARI de Cantagallo, es importante aclarar, que la planta de operación para Ecoflot prototipo podrá operar para producción continua (con etapas de tiempo) o en lotes de agua tratada.

4.2 PFD DE PLANTA ECOFLOT PROTOTIPO

La planta Ecoflot prototipo tiene características precisas de operación, que inducen una dinámica de entradas y salidas de materia prima para cumplir con el objetivo de remoción. Sin embargo, dicha dinámica está sujeta a cambios que permitan experimentar desde diferentes perspectivas la producción y flotación de burbujas. A continuación, se determinan dichas entradas y salidas, teniendo en cuenta las etapas y unidades fundamentales descritas en la sección anterior (ver tabla 20).

Tabla 20 Entradas y salidas de planta Ecoflot prototipo.

ENTRADA	OPERACIONES	SALIDA
Agua natural Crudo de petróleo	Recepción de insumos	3,64 m ³ de agua natural. 1 gota de crudo de petróleo

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPEPETROL

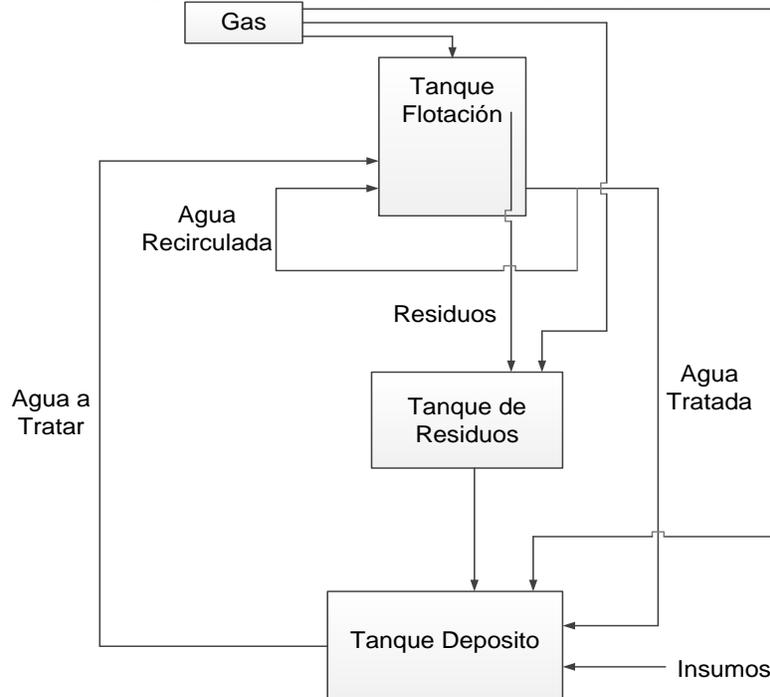
3,64 m ³ de agua natural. 1 gota de crudo de petróleo	Mezclado y Calentado del agua a tratar	Mezcla de agua y crudo (3,64 m ³ de agua por 1 gota de crudo) a 122°F
Mezcla de agua y crudo (3,64 m ³ de agua por 1 gota de crudo) a 122°F	Envió del agua a tratar	Mezcla de agua y crudo (3,64 m ³ de agua por 1 gota de crudo) a 122°F
Mezcla de agua y crudo (3,64 m ³ de agua por 1 gota de crudo) a 122°F Gas blanket a 80 psi	Flotación	Agua tratada + ~ 1 gota de crudo
Agua tratada + ~ 1 gota de crudo	Recepción de residuos	Agua tratada + ~ 1 gota de crudo
Agua tratada + ~ 1 gota de crudo Agua tratada	Depósito de agua tratada y residuos removidos	-----

Fuente: Fuente propia, Mayo de 2016.

El proceso llevado a cabo en planta Ecoflot prototipo inicia con la recepción de insumos, en donde serán inspeccionados y preparados con las cantidades indicadas. Posteriormente, dichos insumos son vertidos en un tanque de depósito para ser mezclados durante un periodo de tiempo e iniciar la calefacción de la mezcla hasta lograr una temperatura de 122°F, por medio de una resistencia calefactora instalada dentro del tanque. A continuación, dicha mezcla es transferida hacia el tanque de flotación, en donde inicia la dinámica de Ecoflot prototipo (ver sección 3.3.3, operación Ecoflot). Cuando culmina la flotación de residuos, que dependiendo del tipo de configuración de la planta (producción por lotes: 112 minutos, y producción continua: una etapa inicial de 74,8 segundos para el ascenso inicial de la primera cama de burbujas (ver capítulo 3, sección 3.2.3) varia, inicia la remoción de dichos residuos a través del transporte de las partículas removidas de la tubería de desnate Ecoflot hacia un tanque de residuos. El agua restante en el tanque de flotación es agua tratada, que debe ser enviada al tanque de depósito solo cuando haya terminado la remoción. Con la dinámica anteriormente descrita, se diseña el PFD de la planta (Ver figura 31).

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE COPETROL

Figura 31 PFD de planta Ecoflot prototipo.



Fuente: Fuente propia, Mayo 2016.

4.3 APLICACIÓN DE LA NORMA ISA 88 PARA PLANTA ECOFLOT PROTOTIPO

El proceso llevado a cabo en la planta Ecoflot prototipo está caracterizado por diferentes parámetros, que son los responsables de su correcta operación. Sin embargo, es indispensable plasmar la información de su operación, con el fin de separar recursos (materia prima, insumos, equipos, mano de obra) de las actividades o procedimientos llevados a cabo en la dinámica de la planta. Adicionalmente, aplicar la norma ISA 88 contribuye a la determinación de la instrumentación, equipos y control requerido para el funcionamiento de la misma.

4.3.1 Modelo de Control de Proceso de planta Ecoflot prototipo

El modelo de control de proceso para la planta Ecoflot identifica las actividades indispensables a realizar para que se efectúe la flotación de partículas de crudo, que posteriormente son desnatadas. Asimismo, se deben identificar actividades dentro de la planta, que garanticen la reproducción de las condiciones Ecoflot modelo. Por otra parte, la planta puede operar para dos tipos de producción: lotes o continuo (ver anexo C: Estructuración de información para diseño planta de laboratorio Ecoflot prototipo tipo continuo), lo que conlleva a una identificación previa, seguida

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE COPETROL

de configuración de equipos y parámetros, que afectan directamente las actividades a realizar en la planta. A continuación, se describe el modelo de control de proceso para producción tipo lotes (ver tabla 21).

Tabla 21 Modelo de Control de Proceso tipo lotes de la planta Ecoflot prototipo

Proceso	Etapas de Proceso	Operaciones de Proceso	Acciones de Proceso
Flotación en planta de laboratorio Ecoflot prototipo	Configuración de planta	Determinación tipo de producción lotes	Conectado del tanque de depósitos de remoción con tanque flotación
			Aislado entre tanque de depósito y tanque flotación (Ecoflot prototipo)
			Configurado del tiempo de residencia
	Mezclado y Almacenado	Recepción de Insumos	Recibido de Insumos
			Preparado de los insumos
			Inspección de la mezcla
		Mezclado y Calentado del agua a tratar	Almacenado de la mezcla en tanque de deposito
			Agitación de la mezcla
			Calentado de la mezcla
			Medición de la temperatura del agua a tratar
	Envío del agua a tratar	Traslado de la mezcla a flotación	
	Flotación	Recepción del agua a tratar	Presurización de los tanques
			Ingreso del agua a tratar (mezcla)
		Remoción de residuos	Recirculación de agua a tratar
			Generación de burbujas
			Flotación de partículas
			Desnatado de los residuos
		Envío del agua tratada y residuos	Traslado del agua tratada a deposito
			Traslado de residuos a tanque de depósito de residuos

Fuente: Fuente propia, abril de 2016.

Nota 1: la tabla 21 hace referencia exclusivamente a las actividades a realizar en la planta con producción tipo lotes.

Nota 2: la planta Ecoflot prototipo, dependiendo de la configuración, opera en producción tipo continuo, lo que conlleva a modificar algunas de las actividades fundamentales para operación.

Nota 3: aunque inicialmente, la norma ISA 88 fue diseñada y escrita para estructurar procesos de tipo lotes, en la actualidad, la norma es flexible para estructurar información de procesos y desligar recursos de actividades a realizar. Por tanto, se determinan las actividades fundamentales para configuración tipo continua, con base en el modelo de control de proceso tipo lotes de la tabla 19, en el anexo C: Estructuración de información para diseño planta de laboratorio Ecoflot prototipo tipo continuo.

4.3.2 Modelo Físico de la planta Ecoflot prototipo

El objetivo de establecer el modelo físico es identificar equipos, en donde se llevaran a cabo las actividades fundamentales para el proceso de flotación en Ecoflot prototipo. A continuación, se ilustra el modelo físico para la planta Ecoflot prototipo (ver tabla 22).

Tabla 22 Modelo Físico de planta Ecoflot prototipo tipo lotes

Célula de Proceso	Unidad	Módulo de Equipo	Módulo de Control	
Planta de laboratorio Ecoflot prototipo	configuración	Configuración tipo producción	Válvula	
			Válvula	
			Operario	
	Mezclado y Almacenado	Recepción de Insumos		Operario
				Motor
		Mezclado y Calentado del agua a tratar		Sensor de temperatura
				Resistencia Calefactora
				Operario
		Envió del agua a tratar		Motor de Bomba
	Flotación	Recepción del agua a tratar		Sensor de presión
				Válvula de control
				Sensor de nivel
				Válvula solenoide
				Operario
		Remoción de los residuos		Válvulas solenoides
Motor de bomba				
Tubos venturi				
Operario				
Envió del agua tratada y residuos		Válvula manual		
		Operario		

Fuente: Fuente propia, abril de 2016.

Nota: el modelo físico describe los activos físicos, en donde se realizara el proceso Ecoflot prototipo. Dichos activos físicos son independientes del tipo de proceso llevado a cabo (lotes o continuo), debido a que la planta puede operar en ambas configuración sin alterar completamente sus componentes.

4.3.3 Modelo de control de procedimiento de la planta Ecoflot prototipo

El modelo de control procedimental es indispensable para estructurar y determinar la receta del proceso llevado a cabo en la planta porque plasma información concisa de las acciones, que se deben ejecutar para operar con los parámetros y condiciones establecidos en la fase de diseño. A continuación, se determina el modelo de control de procedimiento para planta tipo lotes (ver tabla 23).

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE COPETROL

Tabla 23 Modelo de Control de Procedimiento de planta Ecoflot prototipo tipo lotes

Procedimiento	Procedimiento de Unidad	Operación	Fase
Procedimiento	Configurado	Configuración tipo lotes	Abrir válvula que conecta tubería externa de remoción con tanque de remoción
			Cerrar válvula que conecta tanque Ecoflot con tanque depósito
			Configurar la apertura de las válvulas internas de remoción tras 122 minutos de inicio de recirculación
Flotación en planta de laboratorio Ecoflot prototipo	Mezclado y Almacenado	Recepción de insumos	Recibir 4 m ³ o más de agua natural
			Recibir 1 cm ³ de crudo de petróleo extraído en Cantagallo
			Preparar 3,64 m ³ de agua natural con 1 gota de crudo de petróleo
			Inspeccionar la mezcla de agua y crudo
		Mezclar y Calentar el agua a tratar	Depositar la mezcla
			Agitar la mezcla durante 5 min
			Calentar la mezcla a 122°F
	Medir la temperatura de la mezcla (122 °F)	Medir la temperatura de la mezcla (122 °F)	
		Enviar el agua a tratar	Enviar el agua a tratar (mezcla) hacia unidad de flotación
			Recepción del agua a tratar
	Flotación	Remover los residuos	
			Recircular 1,76657x 10 ⁻⁴ m ³ del agua a tratar del tanque de flotación a una presión de ~85 psi
			Generar burbujas de ~300 µm de diámetro
			Esperar 112 minutos que termine flotación de partículas
		Enviar el agua tratada	Desnatar ~0,25 m ³ de agua y residuos
			Transferir desnatado a tanque de depósito de residuos
			Transferir agua tratada al tanque de depósito

Fuente: Fuente propia, Abril de 2016.

Nota 1: el modelo representado en la tabla 23 de control de procedimiento es exclusivamente para operación tipo lotes.

Nota 2: aunque se enfatizó acerca del tipo de procesos para aplicación de la norma ISA 88, se adaptó la estructuración del modelo de control de

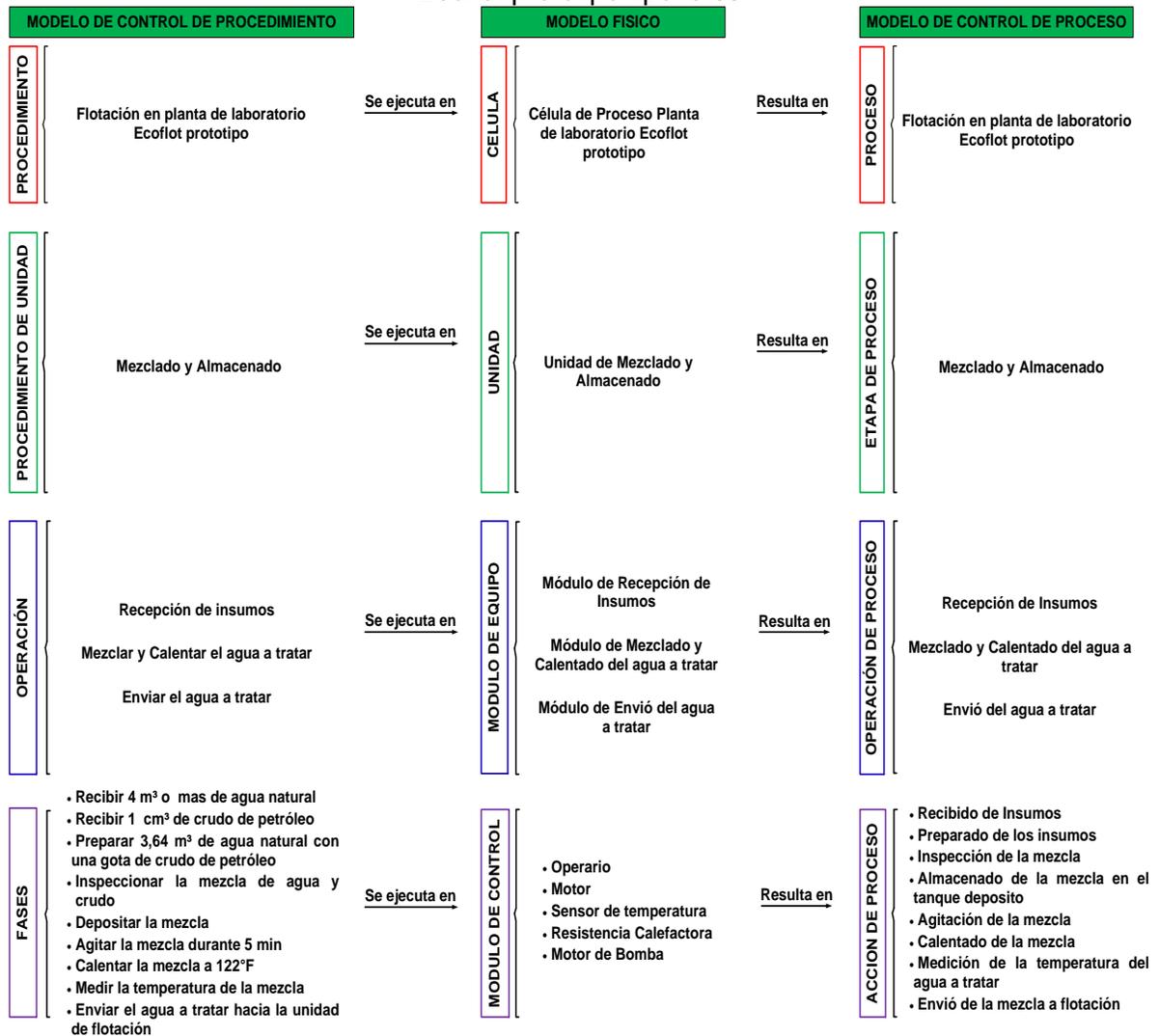
procedimiento para obtener información concisa de la planta Ecoflot prototipo que operará para producción continua (ver anexo C: Estructuración de información para diseño planta de laboratorio Ecoflot prototipo tipo continuo).

4.3.3 Relación entre los Modelos de ISA 88

La relación entre los modelos, anteriormente planteados para la planta en operación tipo lotes, expone como se ejecutan las tareas dentro de los equipos asignados para la realización de actividades fundamentales de control, que permiten la operación. Por tanto, los resultados arrojan la conformación final del proceso a ejecutar. A continuación, se representa gráficamente dicha relación para la operación de mezclado y calentado (ver figura 32).

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

Figura 32 Relación entre los tres modelos de ISA 88 de mezclado y almacenado de planta Ecoflot prototipo tipo lotes

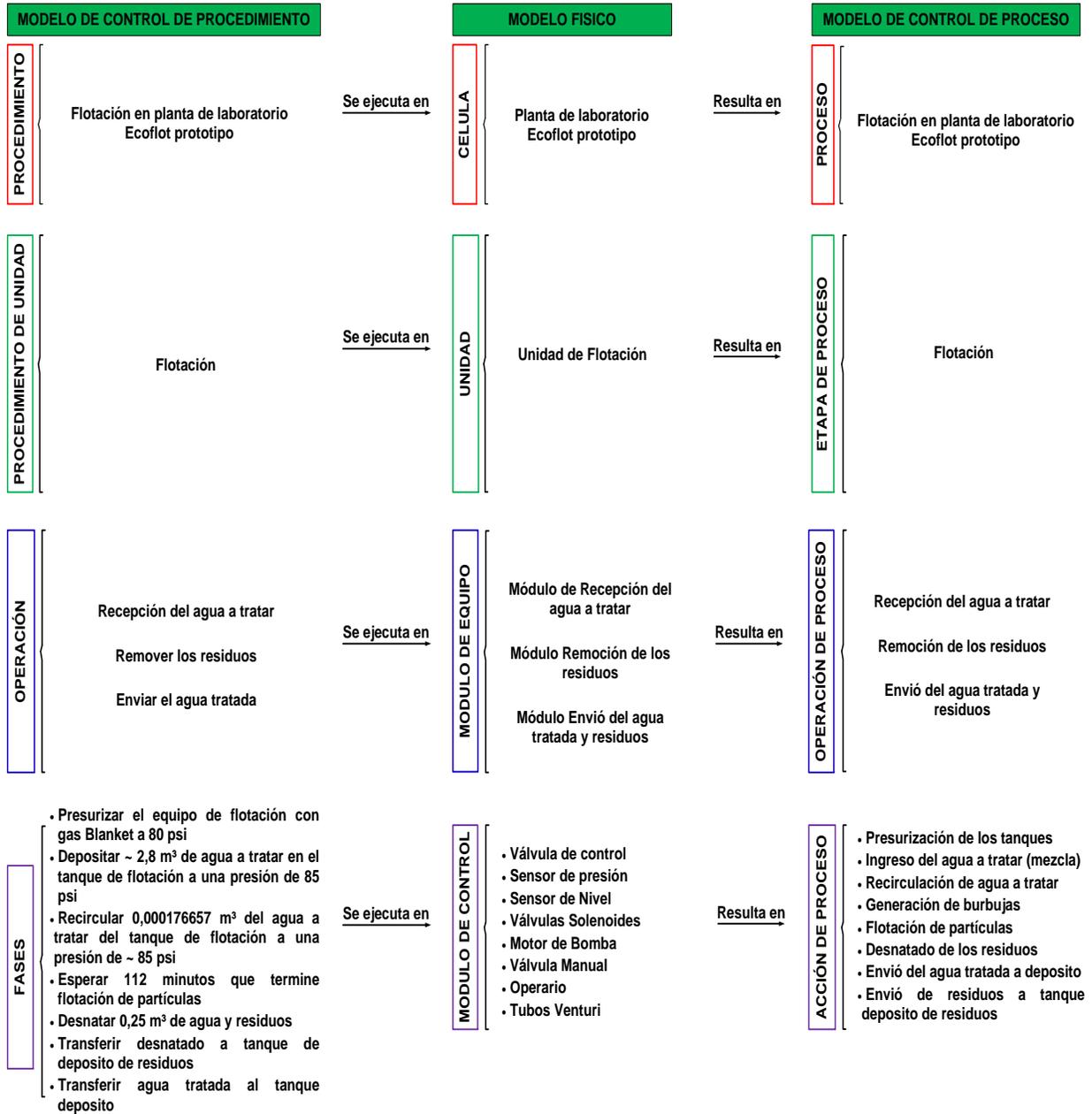


Fuente: Fuente propia, Abril de 2016.

Nótese, que la relación de los modelos comienza a partir de la segunda unidad, debido a que es la primera que interfiere directamente con la dinámica de flotación para producción por lotes. Por tanto, no se propone una relación de modelos para la etapa de configuración del modo de operación, sino de las dos unidades que ejecutan las condiciones y el procedimiento para limpiar aguas. A continuación, se relacionan los modelos de la tercera unidad de planta de laboratorio Ecoflot prototipo tipo lotes (ver figura 33).

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

Figura 33 Relación entre los tres modelos de ISA 88 respecto al procesamiento de unidad
Flotación



Fuente: Fuente propia, Abril de 2016.

4.4 DIAGRAMA P&ID DE LA PLANTA ECOFLOT PROTOTIPO

La aplicación de la norma ISA 88 para la planta Ecoflot prototipo arroja como resultado una visión clara y concisa de las actividades fundamentales y equipos, que interfieren en el proceso. Por tanto es posible determinar un diagrama P&ID, que incluye lazos de control, tuberías equipos e instrumentos necesarios para

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE COPETROL

garantizar la ejecución adecuada del proceso. A continuación, se listan los equipos e instrumentos mencionados en el P&ID de la planta (ver tabla 24 y figura 34).

Tabla 24 Lazos de control y etiquetas de los elementos del P&ID de planta Ecoflot prototipo.

TAG	Lazo	Elemento	Descripción
TK	101-1	Tanque deposito	Tanque de almacenamiento del agua a tratar y agua tratada
			Tanque de mezclado y calentado de insumos
TE	101-1	Sensor de temperatura	Sensor que mide la temperatura del agua a tratar dentro del TK 101-1
TIT	101-1	Transmisor indicador de temperatura	Indica, convierte y envía la temperatura censada por el TE 101-1 al controlador de temperatura
TY	101-1	Transductor de temperatura	Recibe y lee la señal del controlador, la convierte y la envía hacia la resistencia calefactora.
TC	101-1	Controlador de temperatura	Controla la temperatura del agua a tratar dentro del TK 101-1 a través de la regulación de acción de la resistencia calefactora.
TK	101-2	Tanque de flotación	Tanque donde se realiza la remoción de residuos del agua a tratar
LC	101-2	Controlador de nivel	Controla el nivel del agua a tratar dentro del TK 101-2
LSH	101-2	Transmisor de nivel por alta	Interruptor activado cuando el nivel de agua a tratar dentro del TK 101-2 llega al nivel requerido
LIT	101-2	Transmisor indicador de nivel	Mide y acondiciona el nivel del agua a tratar y transmite una señal eléctrica al LC 101-2
PUMP	101-2	Bomba	Envía el agua a tratar del TK 101-1 hacia el TK 101-2
FY	101-2	Transductor de frecuencia	Recibe y convierte la señal eléctrica del controlador y envía una señal PWM al motor de PUMP 101-2
SFV	101-2	Válvula solenoide de flujo	Válvula que permite el paso del agua a tratar hacia el TK 101-2
BC	101-3	Controlador por lotes	Controlador para la activación de PUMP 101-3
PUMP	101-3	Bomba de recirculación	Recircula un porcentaje del agua tratada proveniente del TK 101-2
FY	101-3	Transductor de frecuencia	Recibe y convierte la señal eléctrica del controlador y envía una señal PWM al motor de PUMP 101-3
PI	101-3	Indicador de presión	Manómetro que muestra el nivel de presión del agua recirculada
FI	101-3	Indicador de flujo	Indica el flujo del agua recirculada

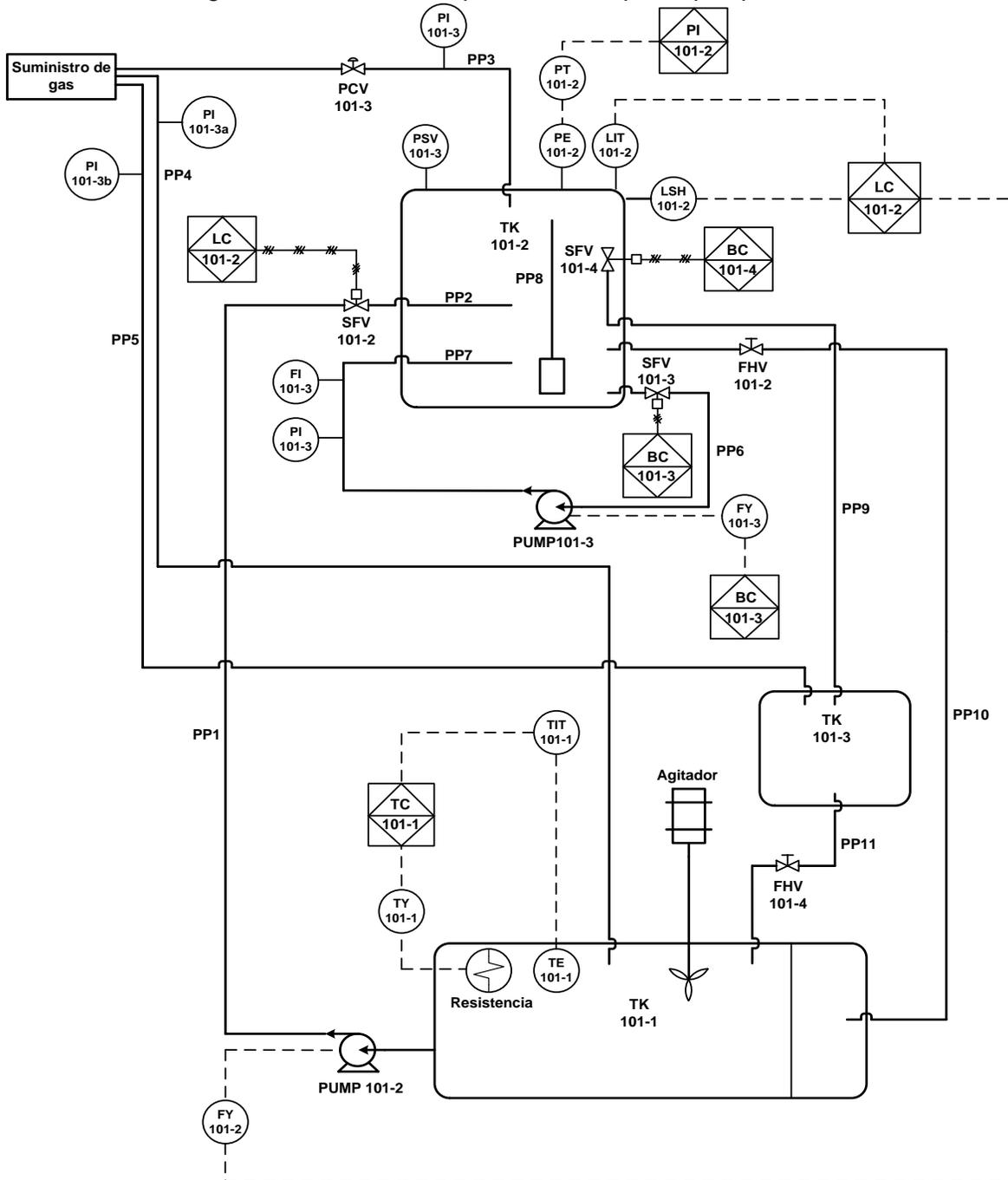
DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

BC	101-3	Controlador Batch	Controlador que gobierna el comportamiento la SFV 101-3
SFV	101-3	Válvula solenoide de flujo	Válvula que permite el paso del agua tratada a ser recirculada
PSV	101-3	Válvula de seguridad de presión	Se activara en el instante que se presente un incremento en la presión dentro del TK 101-2
PI	101-3a	Indicador de presión	Manómetro que muestra el nivel de presión del gas que ingresa al TK 101-1
PI	101-3b	Indicador de presión	Manómetro que muestra el nivel de presión del gas que ingresa al TK 101-3
PI	101-3	Indicador de presión	Manómetro que muestra el nivel de presión del gas que ingresa al TK 101-2
PCV	101-3	Válvula de control de presión	Válvula que permite regular la presión del gas al ingreso del TK 101-2
PE	101-2	Sensor de presión	Sensor que mide la presión dentro del TK 101-2
PT	101-2	Transmisor indicador de presión	Indica, convierte y envía la presión censada por el PE 101-2 al indicador de presión
PI	101-2	Indicador de presión	Muestra la presión dentro del TK 101-2
FHV	101-2	Válvula manual de flujo	Válvula manual que permite el flujo de agua tratada desde el TK 101-2 hacia el TK 101-1
BC	101-4	Controlador lógico programable	Controlador que gobierna el comportamiento la SFV 101-4
SFV	101-4	Válvula solenoide de flujo	Válvula que permite el desnate de los residuos que se generan en el TK 101-2 y son enviados al TK 101-3
TK	101-3	Tanque de residuos	Tanque de recepción y almacenamiento de residuos provenientes del TK 101-2
FHV	101-4	Válvula manual de flujo	Válvula manual que permite el flujo de residuos desde el TK 101-3 hacia el TK 101-1

Fuente: fuente propia, Abril de 2016.

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

Figura 34 P&ID de la de planta Ecoflot prototipo tipo lotes.



Fuente: fuente propia, Abril de 2016.

Nótese, que para diseñar el P&ID de la planta, se utilizan etiquetas las cuales son relacionadas y asignadas a la instrumentación y equipos que se desean instalar en la planta. A continuación, se listan las etiquetas empleadas (ver tabla 25).

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

Tabla 25 Etiquetas de tubería del P&ID

TAG	Desde	Hasta	Descripción	Tubería
PP1	Tanque deposito	Tanque de flotación	Tubería de suministro de agua a tratar	5"
PP2	Tanque deposito	Tanque de flotación	Tubería secundaria de suministro de agua tratar	3,25"
PP3	Suministro de gas	Tanque de flotación	Presurización del TK 101-2	2"
PP4	Suministro de gas	Tanque deposito	Presurización del TK 101-1	2"
PP5	Suministro de gas	Tanque de residuos	Presurización del TK 101-3	2"
PP6	Tanque de flotación	Tanque de flotación	Tubería principal de recirculación de agua	4"
PP7	Tanque de flotación	Tanque de flotación	Tubería secundaria de recirculación de agua	2"
PP8	Tanque de flotación	Tanque de flotación	Suministro de gas a los venturi	2"
PP9	Tanque de flotación	Tanque de residuos	Tubería de desnate	1/2"
PP10	Tanque de flotación	Tanque deposito	Tubería de salida de agua tratada	3"
PP11	Tanque de residuos	Tanque deposito	Tubería de envió de residuos	1/2"

Fuente: fuente propia, Marzo 2016.

4.5 CONTROL DE PLANTA ECOFLOT PROTOTIPO

Con el fin de gobernar las acciones del proceso de la planta Ecoflot prototipo, se diseña un sistema de control, basados en tres pilares fundamentales: medir, controlar y actuar. Como primera medida, se determina el valor de operación de la variable controlada. Posteriormente, se compara dicho valor con el valor deseado correspondiente, para determinar el esfuerzo de control que afecta el valor de la variable controlada. Finalmente, se envía la señal al actuador (elemento final de control), que realiza los ajustes necesaria para mantener la dinámica deseada del proceso [58]. Sin embargo, existe una fase dentro del proceso, que permite el diseño de un lazo abierto debido a la simplicidad de su dinámica.

4.5.1 Esquemas de control de planta Ecoflot prototipo

La planta Ecoflot prototipo requiere implementar dos sistemas de control en lazo cerrado, el primero para mantener estable la temperatura del agua a tratar dentro del tanque depósito. El segundo, para conservar el nivel dentro del tanque de flotación. El sistema de control en lazo abierto, se utilizará para el accionamiento de la bomba de recirculación en la operación de flotación. A continuación se explica el funcionamiento de cada uno:

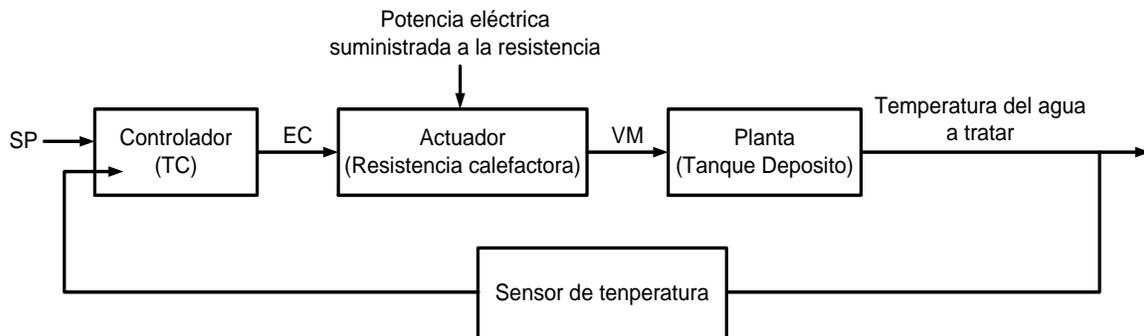
a) Control de la temperatura

Con el fin de representar las condiciones de operación presentes en campo, es necesario que el agua a tratar se encuentre a una temperatura de 50°C. Por tanto, esta adecuación se realiza mediante el empleo de una resistencia calefactora instalada en el tanque depósito. Al analizar, la información expuesta, se plantea la información para determinar el sistema de control:

- Variable controlada: temperatura del agua a tratar
- Variable manipulada: potencia eléctrica suministrada a la resistencia
- Disturbios: variación en la potencia eléctrica que requiere la resistencia para llegar a la temperatura deseada de operación.
- SP: 50°C

Con base en la información expuesta, se determina un sistema de control en lazo cerrado (ver figura 36).

Figura 35 Diagrama de bloques del sistema de control de temperatura



Fuente: fuente propia, Abril 2016.

El esquema de control tendrá un sensor de temperatura (TE), instalado en el tanque depósito para tomar la temperatura del agua a tratar. Una vez el agua llegue a los 50°C, el sensor envía una señal eléctrica al transmisor indicador de temperatura (TIT) y posteriormente hacia el controlador de temperatura (TC), el cual es el encargado de determinar el esfuerzo de control para mantener el valor deseado.

b) Control de Nivel

Para garantizar el desnate adecuado de los residuos y el depósito del agua a tratar en tanque de flotación, se debe controlar su nivel (1,2 m) a través de la activación de la bomba (PUMP 101-2), ya que es la encargada de mantener un flujo determinado de agua a tratar desde el tanque depósito hacia el tanque de flotación (TK 101-2). Una vez el agua llegue al nivel requerido, se debe desactivar la bomba, y por tanto, la válvula solenoide de

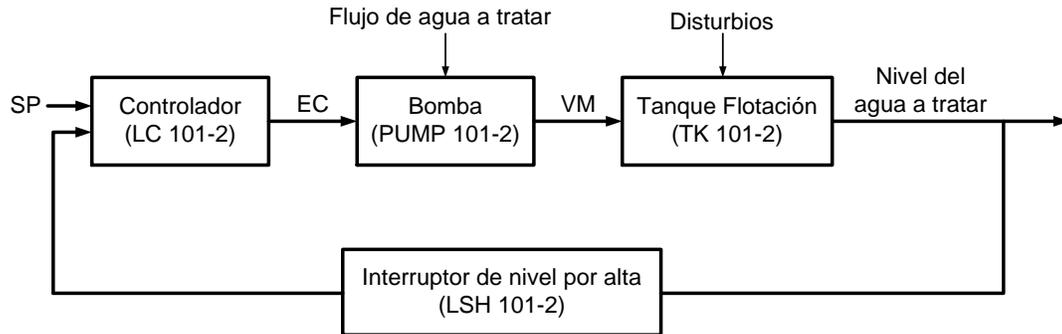
DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE COPETROL

flujo (SFV 101-2) se cerrara. Con base a las condiciones propias del sistema, se resume:

- Variable controlada: el nivel del agua a tratar dentro del tanque de flotación.
- Variable manipulada: flujo de agua a tratar, a cargo de la bomba.
- Disturbios: variación en el flujo de agua a tratar, puede presentarse si ocurre algún comportamiento no deseado en el funcionamiento de la bomba.
- Valor deseado: 1,2 m.

A continuación, se plantea el sistema de control en lazo cerrado descrito anteriormente (ver figura 35).

Figura 36 Diagrama de bloques del sistema de control de nivel para tanque de flotación Ecoflot prototipo.



Fuente: fuente propia, Abril 2016.

El lazo de control estará conformado por un interruptor de nivel por alto para tomar el nivel del agua a tratar, que se deposita dentro del tanque de flotación. Dicho interruptor enviará una señal digital al controlador. Posteriormente, el controlador envía la orden de desactivación de la bomba.

Nota: el controlador emplea la acción de control On-Off, en la cual se compara la variable controlada con el valor del set point y se toma una de las dos posibles acciones.

c) Control de la bomba de recirculación

Para la recirculación de agua tratada, se emplea un sistema de control en lazo abierto, debido a que solo se pretende activar y desactivar la bomba encargada de esta fase, por tanto, se diseña la planta para garantizar el flujo de caudal requerido para la generación de microburbujas. La bomba de recirculación será activada por el PLC, tras alcanzar 1,2 m de agua a tratar en el tanque de flotación.

4.6 INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPOS DE LA PLANTA ECOFLOT PROTOTIPO

Para la selección de la instrumentación y equipos, se tuvo en cuenta las condiciones de operación que requiere la planta para su funcionamiento. Así como, las unidades que conforman la planta, su funcionamiento. Cabe señalar, que para realizar una buena selección de un controlador, se debe tener en cuenta dos aspectos importantes: cantidad y tipo de entradas y salidas, que se requieren para llevar a cabo las fases. Adicionalmente, la capacidad de memoria y programa necesario para ejecutar de manera adecuada el proceso a nivel de laboratorio.

En la planta Ecoflot prototipo hay instrumentación adicional involucrada en el funcionamiento de las unidad de proceso de flotación como: válvula solenoide de flujo SFV 101-4, la cual es activada a través del controlador, una vez se cumpla con el tiempo de residencia, esta acción se realiza con el fin de darle salida a los residuos generados por la remoción efectuada en el tanque de flotación. En el caso de la válvula solenoide de flujo SFV 101-3, será activada una vez el agua a tratar llegue al nivel requerido dentro del tanque de flotación, esta se abrirá y dará paso al agua que debe ser recirculada por la bomba PUMP 101-3. Adicionalmente, cuando se encuentre cerrada cumplirá con el objetivo de mantener las condiciones de presión de operación dentro del tanque de flotación.

Finalmente, la instrumentación de la planta está dada por las condiciones y productos comerciales encontrados y listados por proveedores. Para información detallada acerca de la instrumentación y sus equivalentes comerciales: ver anexo 4: Instrumentación y equipos de planta de laboratorio.

4.7 SIMULACIÓN DEL PROCESO EN CADSIM PLUS

En el capítulo tres del presente trabajo, se establecieron condiciones de operación y parámetros específicos para lograr la operación del sistema. Para cumplir con dichas parámetros de operación, se determinó modelar una planta a nivel de laboratorio con el propósito de lograr el correcto funcionamiento del sistema. Asimismo, fue necesario hacer uso de la norma ISA 88 para estructurar y discernir información relevante. Con base en el modelado de la planta, se procede a implementar la simulación de la configuración por lotes en el programa CadSim Plus.

4.7.1 Requerimientos para simulación planta Ecoflot prototipo

Inicialmente es necesario establecer requerimientos (ver capítulo 3, Condiciones de operación Ecoflot prototipo y Capítulo 4, Modelo control procedimental), estos se dividen en tres grupos: requerimientos de proceso (hacen referencia a las materias primas y productos intermedios); requerimientos de control (se refieren a los valores que se esperan obtengan las variables de proceso) y requerimientos de equipos (ver anexo 4: Instrumentación y equipos de planta de laboratorio).

4.7.2 Implementación en CadSim Plus

Los siguientes pasos describen como utilizar el programa CadSim Plus para la simulación de la dinámica global de la planta Ecoflot prototipo, para lo cual es necesario las unidades que conforman el proceso (modelo físico): unidad de mezclado y almacenado y unidad de flotación (referenciar tesis y tg).

- a) Pasos de Simulación: A continuación, se detallan los pasos a seguir para realizar la simulación en la herramienta computacional escogida:
 1. Crear y configurar un proyecto en CadSim Plus: iniciar un nuevo dibujo, escribir nombre y margen delimitador, que permita incluir las unidades de proceso presentes en el P&ID.
 2. Graficar las unidades y corrientes de proceso requeridas para cada etapa de la planta: se hace uso de los módulos dispuestos en la librería del programa para diseñar cada una de las unidades. En caso, que alguna unidad no se encuentre en la librería de CadSim Plus, se pueden emplear ecuaciones, unidades lógicas y otras unidades, que al ser utilizadas en conjunto puedan asemejar el comportamiento de la unidad que se requiere. En cuanto a las corrientes de proceso, es posible unir las unidades e instrumentación de la planta a través de esbozado de líneas de proceso.
 3. Definir y configurar las corrientes de proceso: previo a la ejecución de la simulación, el programa requiere la definición de valores iniciales de cada una de las corrientes de proceso presentes en el modelo de unidad. Por lo cual, se debe añadir los flujos, ya sean agua, aceite, gas, etc. La configuración de estos

flujos, se puede hacer mediante valores constantes o utilizando ecuaciones y relaciones con otras variables y líneas de proceso, que permitan obtener el valor requerido.

4. Verificación y evaluación de la simulación: una vez realizados correctamente los pasos anteriores, el programa ejecuta animaciones, realiza cálculos, despliega gráficos de tendencias y permite observar los valores ingresados, del tal forma que el usuario inspeccione los valores y comportamientos de los flujos de proceso presentes en el modelo, y a partir de ahí deducir si el funcionamiento de la unidad es adecuado o es necesario recurrir a alguna mejora en el proceso de diseño.
5. En el caso que la unidad diseñada funcione correctamente, se procederá a introducir la siguiente unidad de proceso utilizando los pasos anteriores. hasta completar el modelo de la planta.

b) Simulación por unidad de planta

A continuación, se aplican los pasos de simulación de CadSim Plus para el diseño de cada una de las unidades de proceso:

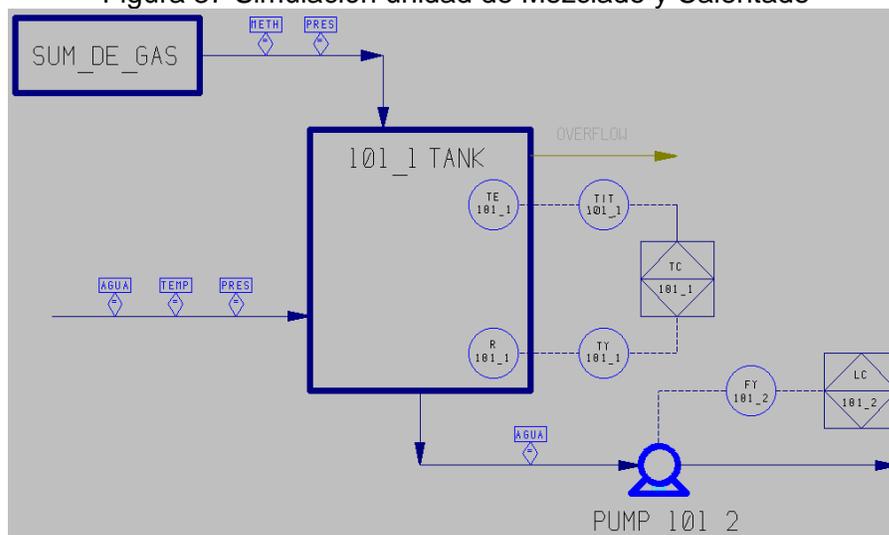
- Unidad de Mezclado y Calentado
-
- ✓ Iniciar CadSim Plus, abrir un nuevo dibujo y guardarlo con el nombre "Planta TARI". De esta forma se obtendrá un archivo con extensión .dra, en el cual se realizará el diseño y configuración de las unidades que conformarán el modelo de la planta a nivel de laboratorio.
 - ✓ Se procede a insertar un marco delimitador tipo A2, se debe dirigir hacia la barra de menú del simulador y seleccionar la opción Insertar > Parte > Standar > Borders.
 - ✓ La primera unidad de proceso que se desea diseñar en CadSim Plus, requiere de un tanque de almacenamiento, un mezclador, un control de temperatura y una bomba encargada de la transferencia del agua a tratar hacia la unidad de flotación. Con base en esto se hace uso de la unidad "Tank" que presenta la librería del programa, se debe dirigir hacia la barra de menú y seleccionar la opción Insertar > Part > Part Library (Standard) > Process > Tank.dra. Esta unidad trae por defecto una salida nombrada "OVERFLOW" que es la línea de rebose.
 - ✓ Se dibujan dos líneas de proceso de entrada y una de salida para el tanque. En una de las entradas ingresa el agua a tratar y en la otra ingresa el gas para la presurización del tanque. En la línea de salida se presentara el agua a tratar a una temperatura de 50°C. Para

diseñar las líneas de entrada y salida, se hace uso de la herramienta “línea de proceso” . A cada unidad y línea de proceso se le asignan sus respectivos nombre esto se logra haciendo clic en el icono **A**.

- ✓ Hacer uso del icono crear polígono  para diseñar un suministro de gas, el cual es ubicado en el inicio de líneas de proceso de entrada encargada del ingreso de gas.
- ✓ Posicionar el puntero del programa en la línea de salida del tanque para insertar una bomba centrífuga, dirigirse hacia el menú Insertar > Part > Part Library (Standard) > Pressure > pump.par. La bomba hace parte del control de nivel que se desarrolla en la unidad de flotación.
- ✓ Hacer uso de la opción de control que viene por defecto en el tanque, para crear el correspondiente control de temperatura que se requiere en esta unidad. El cual se emplea con el fin de calentar y mantener la temperatura del agua a tratar.
- ✓ Adicionar la etiqueta correspondiente a cada dispositivo según lo mostrado en el P&ID. Para tal fin se hace uso del icono **A**.

Al finalizar el diseño de la unidad Mezclado y Calentado deberá lucir similar a la Figura 37.

Figura 37 Simulación unidad de Mezclado y Calentado



Fuente: propia, junio 2016.

- ✓ Para configurar las unidades de medida, los flujos y parámetros de las corrientes de proceso se debe dar clic en el icono . La primero que se realiza es definir las unidades de medida, en este caso se trabajan con el sistema internacional de medida, segundo se define el tipo de corriente, en esta caso química, tercero se definen los componentes que

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE COPETROL

se requieren en la unidad, temperatura y presión, y flujos como gas metano, que viene incluido en el programa, para el caso del agua a tratar se crea un nuevo flujo con las propiedades requeridas (Ver tabla 26).

Tabla 26 Valores iniciales de los componentes de la corriente de proceso

Componente	Valor estimado
Agua a tratar (caudal)	0,37372 Kg/s
Densidad del agua a tratar	949,8949 Kg/m ³
Temperatura	50°C
Presión	586,054KPa
Gas metano (presión)	586,054KPa

Fuente: propia, junio 2016.

Nota: el caudal del agua, se expresa en unidades de caudal másico puesto que el programa así lo requiere.

- ✓ Configuradas la corriente de proceso, se procede a ingresar en el modo simulador del programa haciendo clic en el icono . CadSim Plus antes de arrojar algún resultado, es necesario especificar cada uno de los parámetros de los equipos, instrumentación y líneas de entrada y salida presentes en la unidad (ver tabla 27).

Tabla 27 Parámetros relacionados a equipos de la unidad de mezclado y calentado

Equipo e Instrumentación	Nombre	Parámetro	Valor
Tanque	101_1 TANK	Volumen máximo	4,15 m ³
		Volumen inicial	0 m ³
		Area	
		Presión sobre la cabeza de liquido	551,581 KPa
		Altura de entrada agua a tratar	0,5 m
		Altura de salida de agua a tratar a 50°C	0,26 m
Bomba	PUMP 101_2	Eficiencia Mecánica	100 %

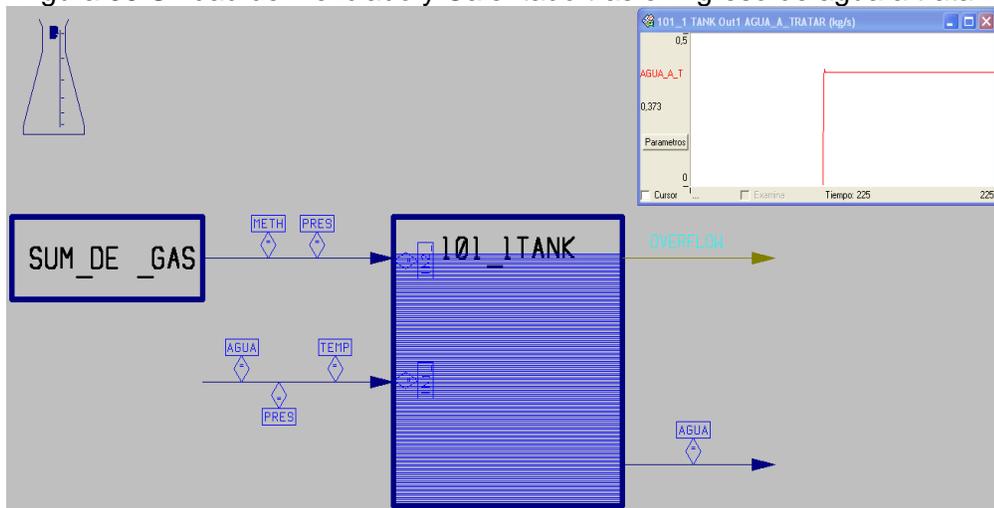
Fuente: propia, junio 2016.

- ✓ Una vez se finalice la configuración de parámetros, el simulador pasa al modo ejecución. En este instante el usuario podrá manipular y observar el comportamiento de la unidad. La simulación muestra el ingreso del agua a tratar, la barra de nivel, dentro del tanque, va aumentando poco a poco hasta alcanzar la altura requerida. Después, el agua es

calentada y posteriormente es enviada a la unidad de flotación a través de la bomba centrífuga.

Si se desea observar el caudal de salida, se deberá hacer uso de la opción “*crear un gráfico*” y posteriormente hacer clic sobre la línea de proceso de salida (ver figura 34). Siempre que se requiera ver el comportamiento de la unidad de proceso e instrumentación relacionada a esta, se tendrá que hacer uso de la opción “*crear un gráfico*”, o si se desea observar el valor de las variables es suficiente con hacer clic sobre la parte de la unidad que se requiera analizar.

Figura 38 Unidad de Mezclado y Calentado tras el ingreso de agua a tratar.



Fuente: propia, junio 2016.

- Unidad de Flotación
- ✓ La unidad de flotación que se desea diseñar en CadSim Plus, requiere de un tanque de almacenamiento, un control de nivel, una bomba encargada de la recirculación de agua a tratar y una serie de válvulas en las líneas de proceso de entrada y salida. Con base en esto se hace uso de la unidad “Tank” que presenta la librería del programa, se debe dirigir hacia la barra de menú y seleccionar la opción Insertar > Part > Part Library (Standard) > Process > Tank.dra. Esta unidad trae por defecto una salida nombrada “OVERFLOW” que es la línea de rebose que en este caso en particular se usará como la tubería de desnate, que requiere la unidad de flotación para la salida de los residuos.

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE COPETROL

- ✓ Se dibujan las líneas de proceso de entrada y las de salida para el tanque. Las líneas de entrada son tres; la primera es para el ingreso del gas Blanket, la segunda es la línea proveniente de la unidad de *Mezclado y Almacenado* y la tercera es para el reingreso del agua a tratar. Las líneas de salida también son tres; la primera es la *tubería de desnate*, la segunda es por donde sale el agua tratada la cual se dirige nuevamente a la primera unidad y finalmente la tercera es empleada para la recirculación del agua a tratar. Para diseñar las líneas de entrada y salida se hace uso de la herramienta "línea de proceso" . A cada unidad y línea de proceso se le asignan sus respectivos nombres esto se logra haciendo clic en el icono **A**.
- ✓ Posicionar el puntero del programa en la línea de salida diseñada para la recirculación para insertar una bomba centrífuga, dirigirse hacia el menú Insertar > Part > Part Library (Standard) > Pressure > pump.par.
- ✓ En la segunda línea de salida ubicar una válvula manual. Dirigirse a la opción Insertar > Part > Part Library (Standard) > Pressure > Valve.par.
- ✓ En la tercera línea de salida se debe ubicar una válvula On/Off. Dirigirse a la opción Insertar > Part > Part Library (Standard) > Pressure > ValvOnOf.par.
- ✓ Para el control de nivel que requiere esta unidad, se hace uso de la opción de control que viene por defecto en el tanque, este se configura de tal modo que su acción de control sea On/Off. Una vez el agua a tratar llegue a la altura de 1,2 m dentro del tanque, el sensor por alta se activa y envía la señal al controlador de nivel y este posteriormente desactiva la bomba PUMP 101_2 para así anular el suministro de agua al tanque.
- ✓ Adicionar la etiqueta correspondiente a cada dispositivo según lo mostrado en el P&ID. Para tal fin se hace uso del icono **A**.
- ✓ La definición de las corrientes de proceso ya han sido establecidas en la realización de la unidad de *Mezclado y Almacenado*. En el caso de la unidad flotación, esta recibe el caudal de flujo de agua a tratar proveniente de la primera unidad y es presurizado a través del suministro de gas.
Se procede a ingresar en el modo simulador del programa haciendo clic en el icono . CadSim Plus requiere que se especifique cada uno de los parámetros de los equipos, instrumentación y líneas de entrada y salida presentes en la unidad (ver tabla 28).

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

Tabla 28 Parámetros relacionados a equipos de la unidad de flotación de planta Ecoflot prototipo.

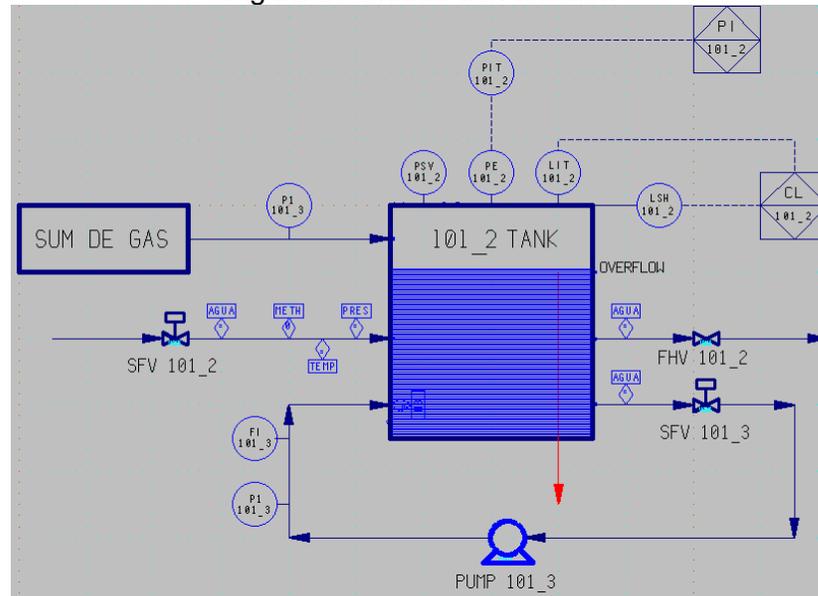
Equipo e Instrumentación	Nombre	Parámetro	Valor
Tanque	101_1 TANK	Volumen máximo	2,8 m ³
		Volumen inicial	0 m ³
		Area	11,3m ²
		Presión sobre la cabeza de liquido	586,054 KPa
		Altura de entrada agua a tratar	0,26
		Altura de salida de agua tratada a 50°C	0,07m
		Altura de recirculación	0,16m
Válvula	SFV 101_2	Porcentaje de apertura	0 apagada – 100 abierta. Solenoide
Válvula	FHV 101_2	Porcentaje de apertura	0 – 100% Manual
Válvula	SFV 101_3	Porcentaje de apertura	0 apagada – 100 abierta. Solenoide
Bomba	PUMP 101_3	Eficiencia Mecánica	100 %

Fuente: propia, junio 2016.

- ✓ Finalizada la configuración de parámetros, el simulador pasa al modo ejecución. En este instante el usuario podrá manipular y observar el comportamiento de la unidad. Para esta etapa del proceso es relevante observar el flujo que se presenta en la línea de salida de rebose (OVERFLOW), puesto que representa el flujo de los sólidos removidos en la unidad de flotación. Al finalizar el diseño y configuración de la unidad de flotación, esta deberá lucir similar a la Figura 39.

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

Figura 39 Unidad de Flotación

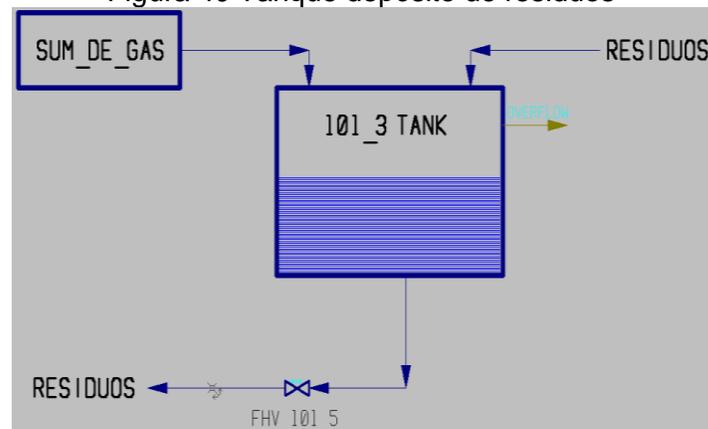


Fuente: propia, junio 2016.

- Unidad de depósito de remoción

Un tercer tanque es ubicado en la planta con el proposito de recibir los residuos, que provienen de la etapa de flotación. Cabe resaltar, que este tanque es opcional para el proceso de la planta (ver figura 40).

Figura 40 Tanque depósito de residuos

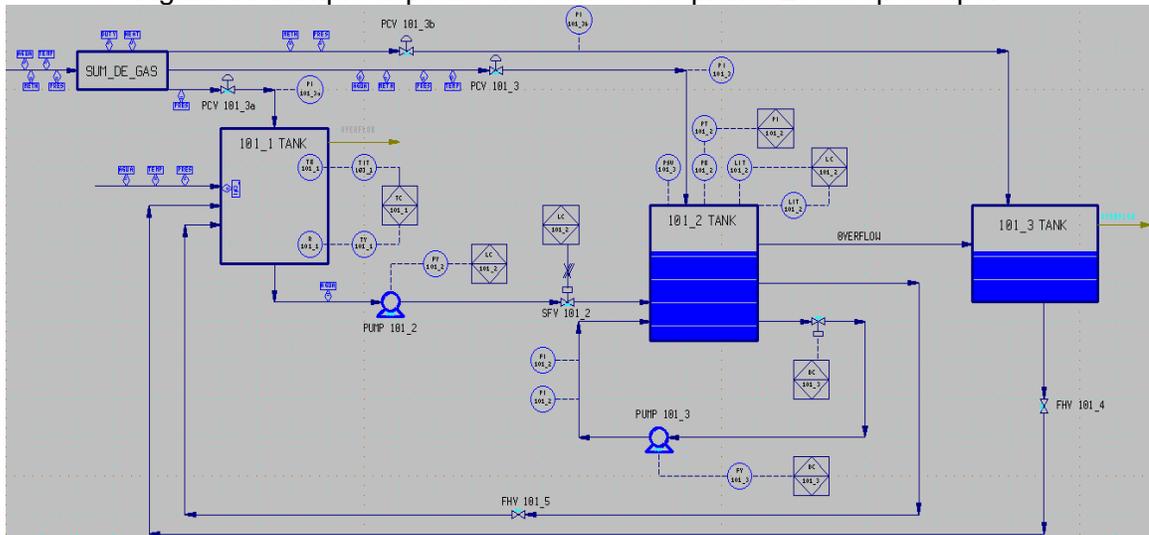


Fuente: propia, junio 2016.

Despues de lograr la configuración y funcionamiento adecuado de cada unidad, la planta finalmente lucirá similar a la figura 41.

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

Figura 41 Tanque depósito de residuos de planta Ecoflot prototipo.



Fuente: propia, junio 2016.

Una vez se ejecute la simulación, se podrá observar el comportamiento de las variables de proceso y los flujos másicos asociados a cada unidad de la planta (ver tabla 29 y 30).

Tabla 29 Comportamiento de la unidad de mezclado y almacenado

Nombre Variable	Grafico	Valor	Descripción
Flujo de entrada de agua a tratar al TK 101_1		0,380399 kg/s	Se observa el valor constante del agua a tratar que ingresa al tanque. Con este valor se lograra alcanzar el volumen máximo requerido en la primera unidad 2,85 m ³
Volumen actual durante el ingreso de agua a tratar al TK 101_1		0 – 2,85 m ³	Representa el ingreso del agua a tratar al TK 101_1, el cual tiene un volumen inicial de cero hasta un volumen máximo de 2,85 m ³

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

Flujo de salida de agua a tratar del TK 101_1		0,3737 Kg/s	El flujo que se observa a la salida del tanque es el necesario para cumplir con las condiciones de operación en la unidad de flotación
---	---	----------------	--

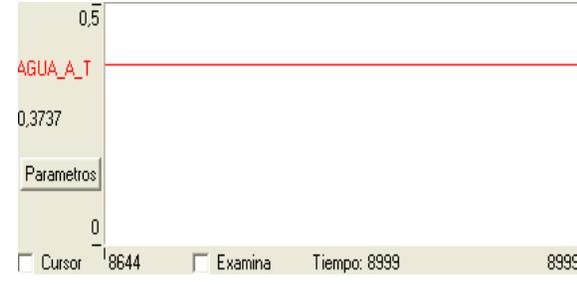
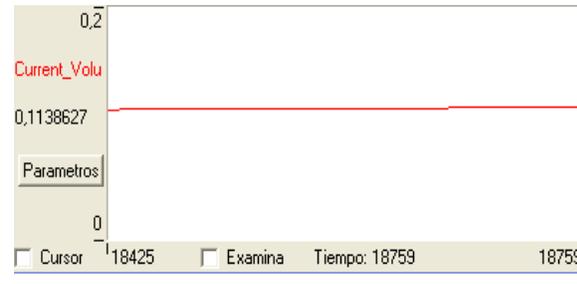
Fuente: propia, junio 2016.

Nota 1: el flujo de agua a tratar disminuye a la salida del 101_TK ya que dentro del programa, se requiere ingresar una línea de desborde (*overflow*) en cada tanque, la cual representa pérdidas de agua dentro del tanque.

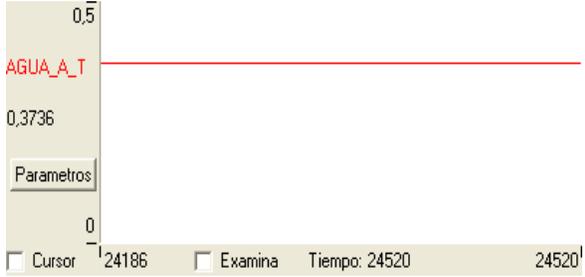
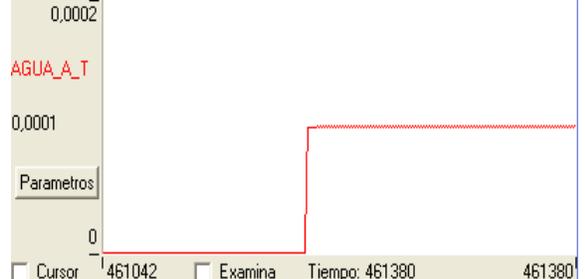
Nota 2: los flujos se representan en unidades de flujo másico ya que el programa empleado en la simulación así lo requiere.

Nota 3: una vez el agua a tratar es enviada a la unidad de flotación, dentro del TK 101_1, quedarán aproximadamente 50 litros del agua a tratar.

Tabla 30 Comportamiento de la unidad de flotación

Nombre Variable	Grafico	Valor	Descripción
Flujo de entrada de agua a tratar al TK 101_2		0,3737 kg/s	Se observa el valor constante del agua a tratar proveniente del TK 101_1. Con este valor se logra alcanzar el volumen máximo requerido en la unidad de flotación
Volumen actual durante el ingreso de agua a tratar al TK 101_2		0 – 2,8 m ³	Representa el ingreso del agua a tratar al TK 101_2, el cual tiene un volumen inicial de cero hasta un volumen máximo de 2,8 m ³

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPEPETROL

<p>Flujo de salida de agua a tratar del TK 101_2</p>		<p>0,3736 Kg/s</p>	<p>Se observa que el flujo a la salida del TK 101_2 disminuye, puesto que la unidad de flotación presenta un subsistema de desnate por el cual se presentan perdidas del liquido</p>
<p>Flujo de agua tratada y residuos removidos</p>		<p>0,0001 Kg/s</p>	<p>Se observar el pequeño porcentaje de agua a tratar que se pierde en el desnate y con ello los residuos removidos</p>

Fuente: propia, junio 2016.

Nota 1: el flujo de agua a tratar que sale de la unidad de flotación es enviado de nuevo al TK 101_1 y los residuos removidos son enviados al tanque depósito y posteriormente al TK 101_1.

Nota 2: la línea de desborde (OVERFLOW) que requiere el programa en cada tanque, es utilizada para representar la tubería de desnate de la unidad de flotación.

CONCLUSIONES

- La planta de laboratorio Ecoflot prototipo puede operar para dos tipos de configuraciones: lotes y continuo. Sin embargo, se concluye que la planta de laboratorio bajo configuración continua es ineficiente debido a que las partículas removidas salen constantemente con una cantidad de agua considerable, lo que repercute en grandes pérdidas de agua a tratar. Adicionalmente, la configuración continua exige un control e instrumentación costo, que aumenta el valor comercial de la planta.
- La planta de laboratorio para configuración por lotes es más rentable debido a que emplea menos instrumentación para operar, comparada con la operación continua. Asimismo, la operación por lotes permite mejorar y/o rediseñar la estructura interna y externa de Ecoflot prototipo, lo que refleja bajar aún más los costos de la planta debido a que es posible suprimir tuberías.
- Las tuberías de recirculación de agua (tubería principal y secundaria), se consideran ineficientes e inútiles para el tipo de configuración lotes, debido a que tienen como objetivo generar un flujo laminar, que afecta directamente el ascenso de partículas. Detalladamente, en la configuración por lotes, el agua ingresa a un determinado tiempo, mientras que el ascenso de burbujas ocurre en un tiempo diferente y posterior, lo que implica la posibilidad de obviar las tuberías internas y solo implementar tuberías externas que conduzcan el agua a tratar hasta el tanque.
- La planta Ecoflot prototipo emplea menos instrumentación para operar, que la planta Ecoflot modelo, lo que mejorará automáticamente el costo de la dinámica del proceso de flotación y es una ventaja visible para la industria petrolera.
- La propuesta metódica planteada por los autores es acertada debido a que arrojó datos, que sirvieron como insumos de diseño de una planta funcional de laboratorio para la operación de flotación.
- Tras el desarrollo de la propuesta metódica, se determinó el valor del tiempo de residencia para Ecoflot prototipo. Sin embargo, se encontró que el valor no difería sustancialmente del tiempo de residencia de Ecoflot modelo, lo que era de esperarse debido a que dichos tiempo de residencia involucran la reacción de dos partículas dentro de un fluido; y por tanto, no está directamente relacionado con las dimensiones y alturas de los tanques.

RECOMENDACIONES

Tras interactuar con la patente Ecoflot surgieron gran cantidad de dudas, algunas fueran resultas con información encontrada en la internet, mientras que otras, se solucionaron con la aplicación de conceptos de mecánica de fluidos. Aunque, aún existen diversas incógnitas de aspectos de implementación y operación real de Ecoflot modelo, los autores proponen una serie de recomendaciones, según lo aprendido. Dichas recomendaciones, abordan dos aspectos fundamentales: generalidades Ecoflot prototipo y sugerencias para un nuevo sistema basado en Ecoflot.

5.1 GENERALIDADES ECOFLOT PROTOTIPO

Las recomendaciones para generalidades Ecoflot prototipo tratan sugerencias, que pueden tenerse en cuenta para complementar el trabajo hecho por los autores, así como propuestas que permitan nuevos experimentos y por ende, nuevos resultados. A continuación, se listan:

- Diseñar una estructura externa, que conforme un montaje para soportar el tanque Ecoflot prototipo. Dicho montaje debe tener en cuenta fuerzas y esfuerzos propios de Ecoflot, el sitio a implementar la planta para diseñar con base a la microzonificación sísmica, así como el tipo de suelos o requerimientos de modularidad y facilidad para transporte de la planta.
- Diseñar tanque Ecoflot prototipo para distintos tipos de material, que permitan interactuar visualmente con la dinámica interna del proceso. Para ello, se sugiere tomar los esfuerzos últimos de fluencia de distintos materiales y equiparlos con los esfuerzos propios de Ecoflot prototipo.
- Presurizar el tanque Ecoflot prototipo con distintos tipos de gas, y fundamentalmente, distintos valores de presión, con el fin de encontrar nuevas relaciones de presión – tamaño de burbuja, presión – cantidad de burbuja o tipo de gas – resistencia de burbujas.
- En caso de contar con nueva información referente a la implementación y funcionamiento de Ecoflot modelo, se recomienda complementar la propuesta metódica de escalamiento (ampliar criterios de similitud) Ecoflot, así como la interpretación de la dinámica del mismo.

5.2 NUEVO SISTEMA BASADO EN ECOFLOT

En este ítem, las recomendaciones apuntan a una propuesta estructural, que de acuerdo a la interpretación por parte de los autores, pueden interferir en la eficiencia (económica, estructural y operativa) de Ecoflot prototipo. A continuación, se listan:

DISEÑO A ESCALA DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE AGUAS DE PRODUCCION
ECOFLOT DE ECOPETROL

Rediseñar la estructura interna de Ecoflot prototipo debido a que cuenta con un número elevado de tuberías metálicas internas, que interfieren directamente con el ascenso de partículas crudo-burbuja. Dicha interferencia, puede traer dos tipos de consecuencias: La primera hace alusión a la muerte prematura de burbujas con tensión superficial débil que explotan tras el choque; y la segunda, hace referencia a una separación entre enlaces débiles de gota de aceite – burbuja provocada por la colisión con alguna tubería.

Como los autores propusieron una dinámica de operación para el funcionamiento de la planta caracterizada por producción en lotes, se recomienda disminuir las tuberías surtidoras de agua, si la planta va a operar en dicha configuración debido a que no interfieren con el ascenso de partículas porque el llenado del tanque (salida de agua por dichas tuberías) es previo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] UPME Unidad de Planeación Minero Energética, *La Cadena del Petroleo en Colombia*. 2005.
- [2] “Nuestra Historia,” 08-Sep-2014. [Online]. Available: http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/acerca-de-ecopetrol/nuestra-historia!/ut/p/z1/tVRdT8lwFP0r-rDH0m7dF74Nieg0RkFA-kK6cQdTto62iPjrLcaYIDpiMpv0obfnnPae3l7M8CNmJX_J51znouRLs54wfxre2VHvitjXvfagSyJneOVdDB17FDt. [Accessed: 08-Mar-2015].
- [3] A. García and P. De Cos, “El precio del petróleo y su efecto sobre el producto potencial,” *Doc. Ocas. ...*, 2009.
- [4] O. Blanchard, “A review of Richard Layard, Unemployment: Macroeconomics, Performance and the Labour Market,” 2014, pp. 1–14.
- [5] “Las reservas de petróleo en Colombia solo dan para 7 años | hidrocarburos | EL UNIVERSAL - Cartagena.”
- [6] “Principales Indicadores Económicos de Colombia para el Día de Hoy en Dinero.Com en Dinero.com.” [Online]. Available: <http://www.dinero.com/indicadores>. [Accessed: 08-Mar-2015].
- [7] O. Forero Sanabria, Jorge Enrique. Diaz Sierra, Javier. Ortiz Cancino, “Sistema de Generación de Burbujas Inmerso en un Tanque de Procesamiento de Líquidos,” WO 2010/067187 A1, 2010.
- [8] E. Agurto, “Mejoras en el Tratamiento de Aguas de Inyección para Campos Maduros de Petróleo usando Microburbujas de gas Natural,” UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA, LIMA-PERU, 2012.
- [9] “INIS Collection Search - Single Result.” [Online]. Available: <https://inis.iaea.org/search/searchsinglerecord.aspx?recordsFor=SingleRecord&RN=42050183#>. [Accessed: 29-Sep-2015].
- [10] “Challenges in Reusing Produced Water | Society of Petroleum Engineers.” [Online]. Available: <http://www.spe.org/industry/challenges-in-reusing-produced-water.php>. [Accessed: 29-Sep-2015].
- [11] R. Arnold, D. B. Burnett, and J. Elphick, “Manejo de la producción de agua : De residuo a recurso En los campos maduros.,” *Oilf. Rev.*, vol. 16, pp. 30–45, 2004.

- [12] N. L. Nemerow and A. Dasgupta, *Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos*. Ediciones Díaz de Santos, 1998.
- [13] A. Rodríguez, P. Letón, and R. Rosal, "Tratamientos Avanzados De Aguas Residuales Industriales," Madrid, España, 2006.
- [14] "Tipologías Aguas Residuales | Cyclus ID." [Online]. Available: <http://www.cyclusid.com/tecnologias-aguas-residuales/tipologias>. [Accessed: 24-Sep-2015].
- [15] M. R. Lapeña, *Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales*. Marcombo, 1989.
- [16] B. Note, *Measuring the impact of water use and promoting efficiency in water management Water footprint – A positive influence on trade*. .
- [17] "Minambiente presenta nueva Norma de Vertimientos que permitirá mejorar la calidad agua del país | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible." [Online]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=1700:minambiente-presenta-nueva-norma-de-vertimientos-que-permitira-mejorar-la-calidad-agua-del-pais>. [Accessed: 24-Nov-2015].
- [18] L. Alberto and E. Torres, "Diseño conceptual para la construcción de una planta de tratamiento e inyección de agua en el Campo Cantagallo," Universidad Industrial de Santander, 2008.
- [19] "Consulta de la Norma: Decreto 1954 de 1984." [Online]. Available: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=18617>. [Accessed: 20-Nov-2015].
- [20] "Sereco Thecnical." [Online]. Available: http://www.sereco.it/vedi_catalogo.php?language=spagnolo&vedi=20120110152115. [Accessed: 24-Sep-2015].
- [21] "Nijhuis Water Technology b.v. - Delivery Program." [Online]. Available: http://www.nijhuis-water.com/es/agua_residual/waste_water_treatment_-_delivery_program.aspx. [Accessed: 29-Sep-2015].
- [22] "Filtración mediante membranas para el tratamiento de las aguas residuales." [Online]. Available: <http://www.aguasresiduales.info/revista/blog/filtracion-mediante-membranas-para-el-tratamiento-de-las-aguas-residuales>. [Accessed: 29-Sep-2015].

- [23] “¿Qué es un Sistema de Flotación? | RWL Water.” [Online]. Available: <http://www.rwlwater.com/que-es-un-sistema-de-flotacion/?lang=es>. [Accessed: 29-Sep-2015].
- [24] L. a. Féris and J. Rubio, “Dissolved Air Flotation (DAF) Performance at Low Saturation Pressures,” *Filtr. Sep.*, no. November, pp. 61–65, 1999.
- [25] J. Rubio, M. L. Souza, and R. W. Smith, “Overview of flotation as a wastewater treatment technique,” vol. 15, pp. 139–155, 2002.
- [26] H. Farajnezhad, P. Gharbani, and A. Branch, “Coagulation Treatment of Wastewater in Petroleum Industry using Poly Aluminium Chloride and Ferric,” *Ijrras*, vol. 13, no. October, pp. 306–310, 2012.
- [27] Y. J. Chan, M. F. Chong, C. L. Law, and D. G. Hassell, “A review on anaerobic–aerobic treatment of industrial and municipal wastewater,” *Chem. Eng. J.*, vol. 155, no. 1–2, pp. 1–18, Dec. 2009.
- [28] R. S. del Río, *Aspectos biológicos de la digestión anaeróbica II.2*. Ediciones Paraninfo, S.A., 2014.
- [29] C. P. L. Grady, G. T. Daigger, and H. C. Lim, “Biological wastewater treatment,” *Hazard. Waste*, vol. October, no. 19, p. 1076, 1999.
- [30] “PanaChlor – Mucho más que agua pura » Microfiltración, Ultrafiltración, Nanofiltración y Ósmosis Inversa.” [Online]. Available: <http://panachlor.com/microfiltracion-ultrafiltracion-nanofiltracion-y-osmosis-inversa/>. [Accessed: 29-Sep-2015].
- [31] “.: Unitek® - Nanofiltración - Ingeniería en tratamiento de agua :.” [Online]. Available: http://www.unitek.com.ar/productos-nanofiltracion.php?id_lib_tecnica=2. [Accessed: 29-Sep-2015].
- [32] N. Academies, “Safe Drinking Water Is Essential.” National Academies, 01-Sep-2007.
- [33] “Nanofiltración y ósmosis inversa.” [Online]. Available: <http://www.lenntech.es/nanofiltracion-y-osmosis-inversa.htm#ixzz3mai7UKOh>. [Accessed: 29-Sep-2015].
- [34] Metso, “Sedimentadores de placas IPS.” 2012.
- [35] “Flocculation systems - Nijhuis Industries.” [Online]. Available: <http://www.nijhuisindustries.com/solutions/coagulation-flocculation-systems/>. [Accessed: 12-Nov-2015].

- [36] “Filtro de Arena para Aguas Industriales - GEDAR - Tratamiento de Aguas.” [Online]. Available: <http://www.gedar.com/industriales/filtracion-industrial/filtro-arena-industrial.htm>. [Accessed: 30-Sep-2015].
- [37] A. Inoxidable and H. Ao, “IAF Sistemas de Flotación por Aire Inducido Sistemas de Flotación por Aire Inducido.” .
- [38] “:: ACS Medio Ambiente :: Clarificadores DAF ::” [Online]. Available: <http://www.acsmedioambiente.com/clarificadordaf.html>. [Accessed: 30-Sep-2015].
- [39] “Reactores biológicos secuenciales (SBR): una tecnología versátil para el tratamiento de aguas residuales industriales.” [Online]. Available: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2006/12/01/53336>. [Accessed: 30-Sep-2015].
- [40] M. Márquez and S. Martinez, “Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA’s o UASB) Antología.” 2011.
- [41] “Pacific Rubiales - Tratamiento de aguas - YouTube.” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=IRVhFAGtHeg>. [Accessed: 20-Nov-2015].
- [42] F. D. Patricia, “Evaluación del desempeño del sistema de bombeo mecanico en los pozos del campo Yariguí-Cantagallo a partir de registros TWM e información de producción,” 2009.
- [43] “Producción y refinación en Regional Centro de Ecopetrol - Otras ciudades - ELTIEMPO.COM,” 2015.
- [44] “Soluciones Almacenamiento | Fibratore.” [Online]. Available: <http://fibratore.co/soluciones-almacenamiento/>. [Accessed: 17-May-2016].
- [45] J. E. Forero, J. Díaz, and V. R. Blandón, “Diseño de un nuevo sistema de flotación para tratamiento de aguas industriales,” *Ciencia, Tecnol. y Futur.*, vol. 1, pp. 67–75, 1999.
- [46] O. P. Forero Sanabria, Jorge Enrique. Duque, Jose Javier. Ortiz Cancino, “Design and Application of Flotation Systems for the Treatment of Reinjected Water in a Colombian Petroleum Field,” vol. 3, pp. 147–158, 2007.
- [47] M. Robert, *Mecánica de fluidos*, Sexta Edic. México, 2006.
- [48] A. A. A. . Ruiz, “Factores de Escala para la Producción Biotecnológica de Etanol Carburante,” Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 2009.

- [49] Á. a. Ruiz and H. Álvarez, “Escalamiento de procesos químicos y bioquímicos basado en un modelo fenomenológico,” *Inf. Tecnol.*, vol. 22, no. 6, pp. 33–52, 2011.
- [50] J. Mayorga, R. Chávez, and J. Delgado Linares, “Escalamiento del reactor del proceso de coquización retardada,” vol. 35, no. 3, pp. 147–156, 2014.
- [51] A. Anaya-durand, H. Pedroza-flores, F. De Química, C. Universitaria, M. D. F. México, P. España, and C. Condesa, “Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto , el paso entre el huevo y la gallina.,” *Tecnol. Cienc.*, vol. 23, no. 1, pp. 31–39, 2008.
- [52] M. Briceño and S. Cobos, “Escalamiento del proceso de mezclado de emulsiones O / W concentradas,” *Rev. Cienc. e Ing.*, vol. 25, 2004.
- [53] L. V. Streeter, *Mecánica de fluidos*, Uno. Michigan, Estados Unidos: LITO EDICIONES OLIMPIA S.A, 1972.
- [54] H. B. Ortiz, “Tratamiento de Aguas Oleosas por Flotación,” Universidad Autónoma del Estado de México, 2002.
- [55] API, *API 650: Welded Tanks for Oil Storage*, vol. 552, no. 3. Estados Unidos, 2012, pp. 1–449.
- [56] I. Shames, “Introduction to Solid Mechanics,” 2003. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/doc/44134667/Introduction-to-Solid-Mechanics-by-Irving-Shames>. [Accessed: 18-May-2016].
- [57] Mazzei, “venturi_injectors | Mazzei,” 2015. [Online]. Available: http://mazzei.net/es/venturi_injectors/. [Accessed: 18-May-2016].
- [58] J. Florez Marulanda, *Instrumentación Industrial*, Primera Ed. Popayán, 2006.