

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

ANEXOS



**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
Popayán, Junio de 2015

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

ANEXOS



**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
Ingeniería Automática Industrial
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control

Popayán, Junio de 2016

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. ANEXO A: DECRETO 631 DE 2015 DE DISPOSICIÓN DE AGUAS PARA LA REPÚBLICA DE COLOMBIA.....	6
2. ANEXO B: PROPUESTA METÓDICA PARA ESCALAR ECOFLOT	13
2.1 Fase 1: Elección y determinación de tanque Ecoflot modelo.....	13
2.2 Fase 2: Escalamiento de tanque Ecoflot para planta de laboratorio.....	14
2.2.1 Determinar y/o suponer primera medida del tanque modelo:	15
2.2.2 Encontrar factor de escala o numero adimensional de proporción	17
2.2.3 Relación de dimensiones de Ecoflot modelo con α_1 , para obtener dimensiones del prototipo.	18
2.3 Fase 3: Validación teórica del nuevo sistema Ecoflot para planta de laboratorio 19	
2.3.1 Relación de variables físicas de un comportamiento a repetir del tanque modelo al prototipo.....	19
2.3.2 Determinar cuántas y cuales variables físicas (n) interfieren en la relación anterior. 19	
2.3.3 Determinar las magnitudes fundamentales (m) de las variables físicas y la cantidad de números adimensionales a encontrar.	19
2.3.4 Determinar cada π	20
3 ANEXO C: ESTRUCTURACION DE INFORMACION PARA DISEÑO PLANTA DE LABORATORIO ECOFLOT PROTOTIPO TIPO CONTINIO	23
3.1 Control de proceso de planta de laboratorio tipo continuo Ecoflot prototipo	23
3.2 Control procedimental de planta de laboratorio tipo continuo Ecoflot prototipo ...	24
4 ANEXO D: INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPOS DE LA PLANTA.....	27
4.1 Unidad de Mezclado y Almacenado	27
4.2 Unidad de Flotación	30
5 BIBLIOGRAFIA	39

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Diagrama de alturas del tanque de flotación.....	14
Figura 2 Velocidad de ascenso de las microburbujas	16
Figura 3 PLC	27
Figura 4 Agitador	28
Figura 5 ET 101-1.....	28
Figura 6 TIT 101-1.....	29
Figura 7 Calentador de Brida.....	29
Figura 8 LSH 101-2.....	30
Figura 9 LIT 101-2.....	31
Figura 10 PUMP 101-2.....	31
Figura 11 PUMP 101-3.....	32
Figura 12 SFV 101-4.....	33
Figura 13 SFV 101-3.....	33
Figura 14 SFV 101-2.....	34
Figura 15 PI.....	34
Figura 16 PI.....	35
Figura 17 FI	35
Figura 18 FHV.....	36
Figura 19 PSV.....	36
Figura 20 TK 101-2	37

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Partes que componen Ecoflot prototipo	13
Tabla 2 Parámetros para determinar hsf	16
Tabla 3 Resultados similitud geométrica Ecoflot.....	18
Tabla 4 Modelo de Control de Proceso de planta de laboratorio tipo continuo Ecoflot prototipo	23
Tabla 5 Control de Procedimiento de planta de laboratorio Ecoflot prototipo tipo continuo	24
Tabla 6 Controlador lógico programable	27
Tabla 7. Agitador	28
Tabla 8 Sensor de temperatura (ET 101-1)	28
Tabla 9 Transmisor indicador de temperatura (TIT 101-1).....	29
Tabla 10 Calentador de brida	29
Tabla 11 Interruptor de nivel por alta (LSH 101-2).....	30
Tabla 12 Transmisor indicador de nivel (LIT 101-2)	31
Tabla 13 Bomba (PUMP 101-2).....	31
Tabla 14 Bomba de recirculación (PUMP 101-3).....	32
Tabla 15 Válvula solenoide (SFV 101-4)	33
Tabla 16 Válvula solenoide (SFV 101-3).....	33
Tabla 17 Válvula solenoide (SFV 101-2).....	34
Tabla 18 Manómetro de presión de gas (IP).....	34
Tabla 19 Manómetro de presión de agua recirculada (PI).....	35
Tabla 20 Indicador del agua recirculada (FI)	35
Tabla 21 Válvulas manuales (FHV 101-2, 101-3, 101-4).....	36
Tabla 22 Válvula de seguridad de presión (PSV)	36
Tabla 23 Tanque de flotación (TK 101 - 2).....	37

1. ANEXO A: DECRETO 631 DE 2015 DE DISPOSICIÓN DE AGUAS PARA LA REPÚBLICA DE COLOMBIA

CAPÍTULO I – DISPOSICIONES GENERALES

ARTICULO 1. Objeto y Ámbito de Aplicación. La presente Resolución establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles que deberán cumplir quienes realizan vertimientos puntuales a los cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.

Igualmente, se establecen los parámetros objeto de análisis y reporte por parte de las actividades industriales, comerciales o servicios, de conformidad con el artículo 18 de la presente Resolución.

En el Anexo 2 se relacionan las actividades industriales, comerciales o de servicios, para las cuales se definieron parámetros y valores límites máximos permisibles específicos y de análisis y reporte.

Parágrafo. La presente resolución no aplica a los vertimientos puntuales que se realicen a aguas marinas o al suelo.

ARTICULO 2. Definiciones. Para la aplicación de la presente Resolución se adoptan las siguientes definiciones:

Aguas Residuales Domésticas ARD: Son las procedentes de los hogares, así como las de las instalaciones en las cuales se desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios y que correspondan a:

1. Descargas de los retretes y servicios sanitarios.
2. Descargas de los sistemas de aseo personal (duchas y lavamanos), de las áreas de cocinas y cocinetas, de las pocetas de lavado de elementos de aseo y lavado de paredes y pisos y del lavado de ropa (No se incluyen las de los servicios de lavandería industrial).

Aguas Residuales no Domésticas - ARnD: Son las procedentes de las actividades industriales, comerciales o de servicios distintos a las que constituyen aguas residuales domésticas - ARD.

CAPITULO II – DISPOSICIONES APLICABLES A LOS VERTIMIENTOS PUNTUALES DE AGUAS RESIDUALES

ARTICULO 3. Del cumplimiento de la norma de vertimientos cuando la captación y la descarga se realicen en el mismo cuerpo de agua. Cuando la captación de agua y la descarga de las aguas residuales se realicen en el mismo cuerpo de agua superficial, se procederá a realizar a sustracción del valor de la carga entre las mismas de las cantidades máxicas (Kg) de los metales y metaloides y de los elementos, sustancias o parámetros considerados para la Tasa Retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales.

Para realizar lo anterior, se utilizan los balances de materia o de masa y las caracterizaciones del agua de la captación y la del vertimiento correspondiente, de acuerdo con la actividad industrial, comercial o de servicios específicos.

Una vez efectuada la sustracción, se realiza el cálculo del valor de la concentración del parámetro en el vertimiento puntual y se hace el respectivo control del cumplimiento de la presente Resolución, de acuerdo con los límites máxicos permisibles exigidos para la respectiva actividad industrial, comercial o de servicios.

Parágrafo 1: Los balances de materia o de masa y la realización y caracterización del(os) vertimiento(s) puntual (les) deberán realizarse simultáneamente en el mismo periodo de tiempo calendario.

Parágrafo 2: El balance de materia o de masa debe satisfacer la Ley de Conservación de la materia o de la masa.

ARTÍCULO 4: De los vertimientos puntuales con sustancias radiactivas o radioisótopos. Las sustancias radiactivas o radioisótopos se rigen por lo dispuesto en la Resolución 18 005 de 2010 del Ministerio de Minas y Energía

"Por lo cual se adopta el reglamento para la gestión de los desechos radioactivos en Colombia" o aquella que la modifique o sustituya.

ARTÍCULO 5: Del parámetro de la temperatura y la zona de mezcla térmica. Para todas las actividades industriales, comerciales o de servicios que realicen vertimientos puntuales de aguas residuales a un cuerpo de agua superficial o a los sistemas de alcantarillado público, tendrán en el parámetro de temperatura como valor límite máximo permisible el de 40,00°C.

Para las actividades industriales, comerciales o de servicios (excepto la de generación de energía eléctrica por procesos térmicos (termoeléctricas)), que realicen vertimientos puntuales de aguas residuales a cuerpos de aguas superficiales, la diferencia de los valores de temperatura de la zona de mezcla térmica del cuerpo de agua superficial receptor con respecto a la temperatura del mismo antes del punto del vertimiento puntual, a una distancia máxima de cien metros (100,00 m) deberá ser menor o igual a 5,00°C, considerando para las mediciones y determinaciones la sección transversal y perpendicular del cauce del cuerpo de agua receptor.

Para la actividad de generación de energía eléctrica por procesos térmicos (termoeléctricas), que realicen vertimientos puntuales de aguas residuales a cuerpos de aguas superficiales, deberán presentar ante la Autoridad Ambiental competente la siguiente información con los respectivos soportes técnicos:

1. Las determinaciones de las diferencias de los valores de temperatura en la zona de mezcla térmica del cuerpo de agua superficial receptor tomando como referencia las condiciones de la temperatura del mismo antes del punto de vertimiento puntual y simultáneamente,
2. Las determinaciones de los cambios de los componentes fisicoquímicos e hidrobiológicos del cuerpo de agua superficial receptor tomando como referencia las condiciones del mismo antes del punto de vertimiento puntual.

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

Ambas determinaciones se hacen considerando para las mediciones la sección transversal y perpendicular del cauce del cuerpo de agua receptor y deben efectuarse para diferentes periodos climáticos.

Con esta información, la Autoridad Ambiental competente le establecerá:

- a. La diferencia máxima de temperatura a una distancia de cien metros (100,00 m), en la zona de mezcla térmica y simultáneamente,
- b. la distancia máxima a la cual se tiene una diferencia de temperatura de menor o igual a 5,00 °C

Las distancias consideradas en este artículo se determinan como la distancia paralela al eje longitudinal del cuerpo del agua entre el punto de vertimiento y la sección transversal a dicho eje.

Todas las determinaciones y mediciones establecidas en este artículo, estarán a cargo del responsable de la actividad industrial, comercial o de servicios, aplicando para tales efectos lo establecido en el protocolo para el monitoreo de los vertimientos en aguas superficiales y subterráneas.

CAPITULO III – VALORES LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES MICROBIOLÓGICOS EN VERTIMIENTOS PUNTUALES EN AGUAS RESIDUALES (ARD Y ARnD) A CUERPO DE AGUAS SUPERFICIALES

ARTICULO 6: parámetros de análisis y reporte en los vertimientos puntuales de aguas residuales (ARD Y ARnD) y cuerpos de aguas superficiales. Se realizaran el análisis y reportes de los valores de la concentración en número más probable (NMP/100ML) de los coliformes termotolerantes presentes en los vertimientos puntuales de aguas residuales (ARD Y ARnD) mediante las cuales se gestionan excretas humanas y/o de animales a cuerpos de aguas superficiales, cuando la carga másica en las aguas residuales antes del sistema de tratamiento es mayor a 125,00 Kg/día de DBO5.

Parágrafo: la toma de muestras deberá realizarse de forma simultánea con la caracterización del(os) vertimiento(s) puntual(es), en el mismo periodo de tiempo que dure la misma y en el mismo punto de caracterización.

CAPITULO IV – PARAMETROS DE INGREDIENTES ACTIVOS DE PLAGICIDAD DE LAS CATEGORÍAS TOXICOLÓGICAS IA, IB Y II Y SUS VALORES LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES EN LOS VERTIMIENTOS PUNTUALES DE AGUAS RESIDUALES NO DOMESTICAS – ARnD A CUERPOS DE AGUAS Y ALCANTARILLADO PUBLICO.

ARTICULO 7: Parámetros de ingredientes activos de plaguicidas de las categorías toxicológicas IA IB Y II, y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas superficiales de alcantarillado público. Las actividades que tengan aguas residuales no domesticas – ARnD, y que:

A. usen directamente en su actividad industrial, comercial o de servicios o que las materias primas o insumos contengan plaguicidas con ingredientes activos de las categorías toxicológicas IA IB y II de acuerdo con lo establecido por la organización mundial de salud – OMS y/o el Ministerio de salud y protección social o quien haga sus veces, para:

1. El lavado, la limpieza y/o la desinfección de productos agropecuarios;
2. El mantenimiento de limpieza de aeronaves o de elementos y equipos empleados para su aplicación (aérea o terrestre).
3. El mantenimiento de su infraestructura, incluyendo la asociada con los dos (2) ítems anteriores
4. Sistema de refrigeración enfriamiento e intercambio de calor.

B. Fabrique ingredientes activos de las categorías toxicológicas IA, IB y II, de acuerdo por lo establecido por la organización mundial de la salud – OMS y/o ministerio de salud y protección social o quien haga sus veces y productos formados por estos ingredientes activos.

Deberán cumplir con los límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domesticas –ARnD a los cuerpos de aguas superficiales o al alcantarillado público, que se señalan a continuación.

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

1. El valor límite máximo permisible de la concentración presente en el vertimiento es de 0,001 mg/L para cada una de las siguientes características químicas.

a. Los ingredientes activos de plaguicidas química toxicológica AI con características químicas cuyos valores de dosis letal oral (DL50 Oral) en ratas más altos conocidos sean menores o igual a 20,00 mg/kg de peso corporal, según las referencias reconocidas por el ministerio de salud y protección social o quien haga sus veces.

b. Los ingredientes activos de plaguicidas de la categoría toxicológica cuya información reconocida por el ministerio de salud y protección social o quien haga sus veces, sean catalogadas como extremada o altamente peligrosas.

2. El valor límite máximo permisible de la concentración presente en el vertimiento es de 0,05 mg/L para los ingredientes activos de plaguicidas de las categorías toxicológicas IB, cuyos valores de dosis letal oral (DL50 oral) en ratas más bajos conocidas sean mayores a 20,00 y menores o iguales a 200,00 mg/Kg de peso corporal, según las reconocidas por el ministerio de salud y protección social o quien haga sus veces.

3. El valor límite máximo permisible de la concentración presente en el vertimiento es de 0,10 mg/L para los ingredientes activo de plaguicidas de la categoría toxicológica II exceptuando los clasificados como compuestos organoclorados, cuyos valores de dócil letal oral (DL50 oral) en ratas más bajos conocidos sean mayores de 200,00 y menores o iguales a 2.000,00 mg/Kg de peso corporal, según las referencias reconocidas por el ministerio de salud y protección social o quien haga sus veces.

El valor límite máximo permisible de la concentración presente en el vertimiento es de 0,05 mg/L para los ingredientes activos de plaguicidas de la categoría toxicológica II clasificados como compuestos organoclorados y cuyos valores de dosis letal oral (DL50 oral) en ratas más bajos conocidos sean mayores a 200,00 y menores o iguales a 2.00,00 mg/Kg de peso

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

corporal, según las referencias reconocidas por el ministerio de salud y protección social o quien haga sus veces.

Parágrafo: la concentración total de ingredientes activos de plaguicidas del presente artículo deberá cumplir:

1. la suma total de las concentraciones de los ingredientes activos de plaguicidas cuyo valor individual máximo admisible sea de 0,001 mg/L podrá ser 0,01 mg/L como máximo, sin que en ningún caso se excedan los valores individuales.
2. la suma total de las concentraciones de los ingredientes activos de plaguicidas cuyo valor individual admisible sea de 0,05 mg/L incluyendo los clasificados como compuestos organoclorados, podrá ser de 0,05 mg/L como máximo, sin que en ningún caso se exceda los valores individuales.
3. la suma total de las concentraciones de los ingredientes activos de plaguicidas cuyo valor individual máximo admisible sea de 0,10 mg/L como máximo, sin que en ningún caso se excedan los valores individuales.
4. la suma total de las concentraciones de los ingredientes activos de plaguicidas no podrá ser menor a 1,00 mg/L.

2. ANEXO B: PROPUESTA METÓDICA PARA ESCALAR ECOFLOT

Para garantizar reproducir un prototipo a escala de Ecoflot, es necesario determinar una propuesta metódica, que comprenda los aspectos propios de Ecoflot (criterios de selección). Una vez identificada la literatura alrededor de escalamiento, se desarrolla cuidadosamente la propuesta metódica sugerida por los autores, para garantizar que los resultados sean confiables. A continuación, se aplica la propuesta metódica para seleccionar, dimensionar y validar Ecoflot prototipo:

2.1 Fase 1: Elección y determinación de tanque Ecoflot modelo

Para empezar, el tanque de flotación Ecoflot fue diseñado originalmente para una capacidad instalada de 10K BWPD, 30K BWPD Y 50K BWPD. Sin embargo, el tanque implementando en Cantagallo tiene una capacidad nominal de 35K BWPD. Asimismo, en la descripción documentada de la patente, se nombran diferentes rangos tanto de operación como de dimensiones de donde es imposible obtener información para escalar, debido a que dichos rangos son muy extensos y no arrojan datos mínimos eficaces para obtener proporciones y diseñar la planta de laboratorio. Por ello, para obtener un sistema Ecoflot, se vigiló estrictamente su procedencia y las capacidades para las que fue diseñado. Por otra parte, se aclara que a pesar de la investigación hechas por los autores del presente trabajo, existen partes de funcionamiento de la patente Ecoflot, que no son descritas tácitamente en ninguno de los documentos encontrados en internet y por tanto, los autores escalaran únicamente los datos de los que se tiene información exacta.

La fase 1 de la propuesta metódica hace énfasis a la selección del sistema exacto a escalar. Por tanto, se determinó escalar el sistema Ecoflot implementado en Cantagallo (35K BWPD) con una capacidad de $591,85 m^3$ (ver figura 1), que consta de las siguientes partes (ver tabla 1):

Tabla 1 Partes que componen Ecoflot prototipo

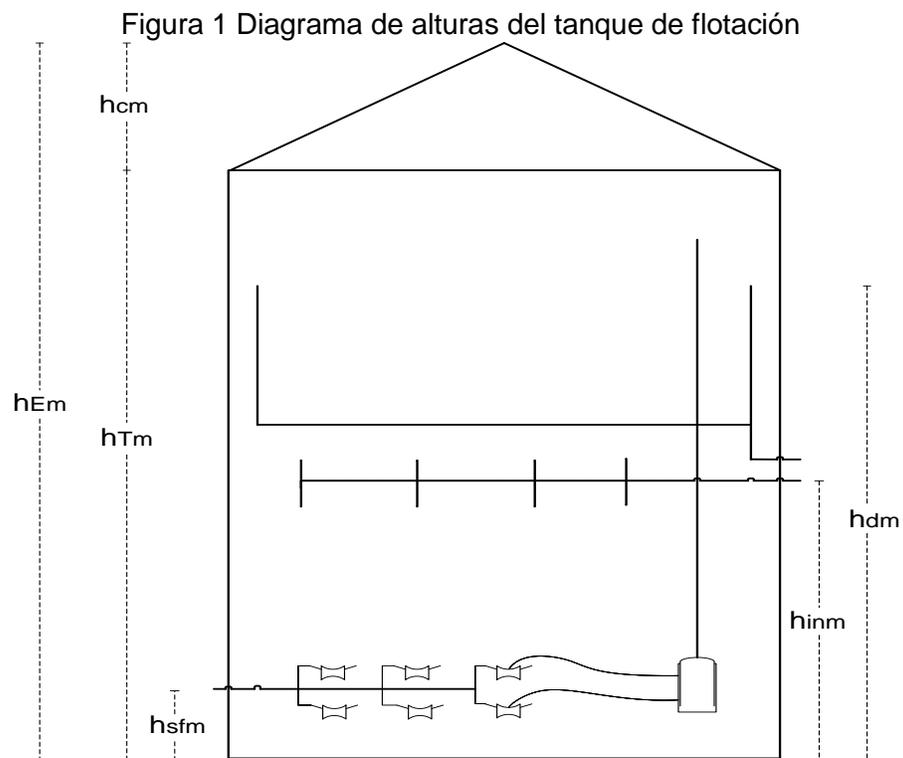
Numero	Sigla	Nombre	Valor (m)
1	$h_E m$	Altura Ecoflot modelo	8,87
2	$h_t m$	Altura tanque modelo	6,72
3	$h_c m$	Altura cabezal modelo	2,15
4	$h_{db} m$	Altura desborde modelo	5,65
5	$h_{outdb} m$	altura salida de desborde modelo	1,7
6	$h_{sf} m$	Altura sistema de flotación	0.86
7	$h_{in} m$	Altura entrada de agua a tratar	1,2

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

		modelo	
8	$h_{ct m}$	Altura control modelo	5,13
9	r_m	Radio Ecoflot modelo	5,05
10	$h_{tr m}$	Altura tubería recirculación modelo	0,86
11	$h_{out m}$	Altura salida de agua tratada modelo	0,4

Fuente: propia, abril 2016.

En la figura 1 es posible detallar la ubicación de los datos descritos anteriormente y visualizarlos en el diagrama pictórico del tanque descrito en la patente.



Fuente: propia, abril 2016.

2.2 Fase 2: Escalamiento de tanque Ecoflot para planta de laboratorio

Una vez identificada la información exacta de Ecoflot, se procede a encontrar el factor de escala para obtener las dimensiones del prototipo. A continuación, se siguen los pasos propuestos en el documento de la monografía (ver capítulo 3, sección 3.2.2) para la fase 2 de la propuesta metódica de escalamiento:

2.2.1 Determinar y/o suponer primera medida del tanque modelo:

Para determinar la primera medida del tanque prototipo, se tienen en cuenta las condiciones de diseño basadas en comportamientos físicos de mecánica. Por tanto, la primera medida a determinar es la *altura de flotación del prototipo*, que corresponde a la longitud recorrida por la microburbuja desde el instante en que sale del sistema de generación, hasta el momento en que llega a la superficie del fluido y las partículas encontradas son desnatadas. Dicha altura de flotación para el modelo es 4,8 m. A continuación, se sugiere un procedimiento para determinar su valor en el prototipo:

Teniendo en cuenta que la altura de flotación está inmersa en un régimen laminar en donde según la ley de stocks, la velocidad de ascenso de las partículas (microburbuja – gota de aceite) es constante, se tiene que:

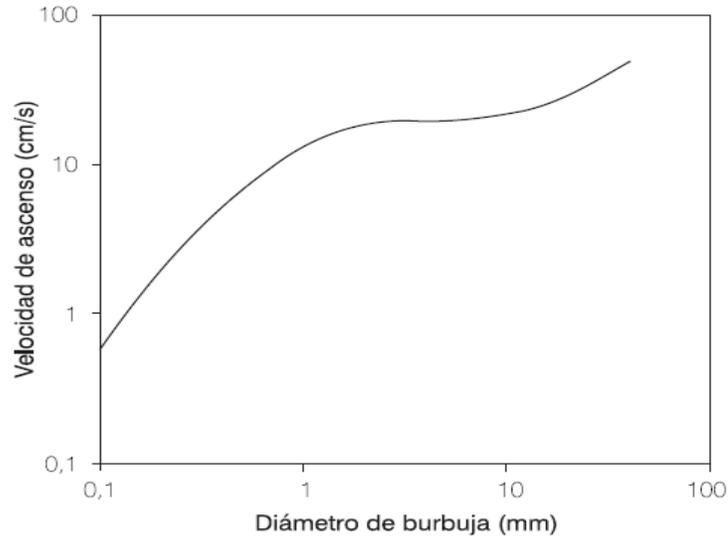
$$V = \frac{h_{ef}}{t_f} \quad (1)$$

Dónde:

- ◆ V: velocidad de ascenso de la partícula
- ◆ h_{ef} : altura efectiva de flotación
- ◆ t_f : tiempo de flotación

De la ecuación 1, es posible determinar la altura de flotación siempre que se conozca la velocidad de ascenso y el tiempo de flotación estimado. Aunque en el documento de la monografía (ver capítulo 2, sección 2.2.1) del presente trabajo, se mencionó la ecuación de stocks para determinar la velocidad de ascenso, para esta fase del escalamiento no se emplea dicha relación porque no se tienen datos exactos de los parámetros químicos de las aguas residuales a tratar que interfieren en la ecuación, adicionalmente, los datos teóricos varían y tiene un porcentaje de error en comparación con los datos prácticos, por lo tanto, se determina la velocidad de ascenso con base en el artículo [1], en donde los autores de la patente plasmaron resultados experimentales de velocidades de ascensos según el tamaño de las microburbujas (ver imagen 2).

Figura 2 Velocidad de ascenso de las microburbujas



Fuente. [1]

Si el sistema de generación de microburbujas de Ecoflot modelo produce burbujas de un tamaño aproximado de 200 μ m [2]; el sistema de generación de microburbujas Ecoflot prototipo generará burbujas hasta de 300 μ m (al ser menor la cantidad de agua residual a tratar en el prototipo, se propone un tamaño de burbujas más grande, que sea capaz de limpiar eficientemente el agua pero implique menos costos de operación en el sistema generador). A continuación, se muestran las velocidades para burbujas del modelo y prototipo (ver tabla 2):

Tabla 2 Parámetros para determinar hsf

Parámetro	Modelo	Prototipo
Tamaño microburbuja	200 μ m	300 μ m
Velocidad de ascenso	0,008 m/s	0,012 m/s

Fuente: propia, abril 2016

Nótese que el valor de la velocidad de ascenso varía muy poco una respecto a la otra (0,004 m/s), lo que era de esperarse porque el área de las burbujas tampoco varía sustancialmente y por ende puede decirse que la fuerza de empuje se mantiene casi constante. Por tanto, puede concluirse que el valor sugerido para el tamaño de burbujas del prototipo, conlleva a un comportamiento casi idéntico al desencadenado por las burbujas del modelo [3].

Ahora, se debe determinar el tiempo de flotación de las microburbujas. Como no se conoce el tiempo de flotación del modelo, primero se calcula dicho tiempo empleando (1):

$$t_{f m} = \frac{h_{ef m}}{V}$$

Reemplazando:

$$t_{f m} = \frac{4,8 m}{0,008 m/s} = 598,87 s$$

Como se conoce $t_{f m}$, se puede tener una aproximación del $t_{f p}$ a partir de una proporción entre dos relaciones: alturas de flotación y tiempos de flotación, como se muestra a continuación:

$$\frac{h_{ef m}}{t_{f m}} = \frac{h_{ef p}}{t_{f p}} \quad (2)$$

La $h_{sf p}$ no se conoce, sin embargo, los autores sugieren un valor ($h_{sf p} = 0,6 m$), teniendo en cuenta el tamaño del prototipo esperado, posteriormente, se despeja $t_{f p}$ de (2) y se reemplazan los valores:

$$t_{f p} = \frac{598,87s \cdot 0,6m}{4,8m} = 74,8 s$$

Ahora, se debe encontrar el valor de $h_{sf p}$ teniendo en cuenta el tamaño de microburbujas, que se producirán en el prototipo. Para ello, se despeja y reemplaza los datos obtenidos en (1):

$$h_{ef p} = v(300\mu m) t_{f p}$$

$$h_{ef p} = 0,89 m \sim 0,9m$$

Nótese, que $h_{ef p}$ es aproximado al valor que los autores sugirieron como consecuencia de emplear $t_{f p}$ encontrado por proporción, por tanto, este valor es el que se empleara en el siguiente paso de escalamiento.

2.2.2 Encontrar factor de escala o numero adimensional de proporción

Para hallar el factor de escala, se empleara la h_{sf} de modelo (tanque Cantagallo) y prototipo (hallada en el ítem anterior). Para ello se emplea la ecuación 3:

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

$$\alpha_1 = \frac{h_{ef\ m}}{h_{ef\ p}} \quad (3)$$

$$\alpha_1 = \frac{4,8\ m}{0,9\ m} = 5,33333333333333 \sim 5,3$$

El factor de escala a usar en el siguiente paso de escalamiento para dimensionar las medidas externas y geométricas del tanque es: 5,3.

2.2.3 Relación de dimensiones de Ecoflot modelo con α_1 , para obtener dimensiones del prototipo.

El factor de escala debe relacionarse con todos los datos del modelo. Para ello se emplea la ecuación (4):

$$Medida\ prototipo = \frac{Medida\ modelo}{\alpha_1} \quad (4)$$

A continuación, se muestra los resultados del dimensionamiento (ver tabla 3), teniendo en cuenta únicamente los datos determinados por los autores:

Tabla 3 Resultados similitud geométrica Ecoflot

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 de 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
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 liquido	h_l	$h_{dbm} + 5\ cm$	5,3	1,2
Radio Ecoflot	r	5,05	5,3	0,9

Fuente: propia, abril 2016.

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

Para asegurar que el comportamiento llevado a cabo en el sistema Ecoflot prototipo (con las dimensiones encontradas por similitud geométrica) es el mismo de Ecoflot modelo, y complementar la fase 2 de la propuesta metódica (criterios de similitud), se aplica el análisis dimensional, con el fin de encontrar una relación que arroje un factor a mantener en ambos sistemas. A continuación, se muestra la aplicación del teorema π de Vaschy y Buckingham:

2.3.1 Relación de variables físicas de un comportamiento a repetir del tanque modelo al prototipo.

El comportamiento central a repetir es el creado a partir de la generación de microburbujas, es decir la velocidad con la que ascienden las partículas (burbuja, burbuja – gota de aceite) desde el instante en que salen de las boquillas (tubos venturi) hasta el momento en el que llegan a la superficie del líquido. Dicha relación, se describió en el capítulo 2, a través de la ley de Stocks, sin embargo, se describe a continuación para determinar las variables y magnitudes físicas que implica.

$$V = \frac{g (\rho_f - \rho_p) D^2}{18 \mu} \quad (5)$$

2.3.2 Determinar cuántas y cuales variables físicas (n) interfieren en la relación anterior.

El comportamiento puede verse como una relación en función de 5 variables físicas ($n = 5$), visto como:

$$R = f (V, g, \rho, D, \mu)$$

2.3.3 Determinar las magnitudes fundamentales (m) de las variables físicas y la cantidad de números adimensionales a encontrar.

Según [4] las magnitudes físicas son valores asociados a una propiedad física medible, y para efectos del análisis dimensional, se

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

deben seleccionar las magnitudes fundamentales, que interfieren en la relación a reproducir en el modelo, como se muestra a continuación:

$$V = [L T^{-1}]$$

$$g = [L T^{-2}]$$

$$\rho = [M L^{-3}]$$

$$D = [L]$$

$$u = [M L^{-1} T^{-1}]$$

Dónde:

- L = longitud
- T = tiempo
- M = masa

Nótese, que en la relación del comportamiento a repetir, hay 3 magnitudes fundamentales ($m = 3$). Por tanto, la cantidad de relaciones adimensionales (π) a hallar está dada por (6):

$$\pi = n - m = 2 \quad (6)$$

2.3.4 Determinar cada π

Para determinar la relación adimensional que se debe repetir en el prototipo, se siguen los pasos propuestos por [3], aplicados a continuación:

a) Relación adimensional π_1

Para encontrar π_1 como primera medida, se seleccionan tres variables físicas a repetir y una no repetitiva. Posteriormente, se asigna un exponente desconocido a las variables repetitivas, como se muestra a continuación (7):

$$\pi_1 = V^{\alpha_1} \rho^{\alpha_2} u^{\alpha_3} D \quad (7)$$

Conceptualmente, la relación descrita en π_1 , debe ser adimensional, por ende, si se describe dicha relación con magnitudes físicas, debe arrojar como resultado un número con cero magnitudes como se muestra a continuación (8):

$$[L T^{-1}]^{\alpha_1} [M L^{-3}]^{\alpha_2} [M L^{-1} T^{-1}]^{\alpha_3} [L] = L^0 T^0 M^0 \quad (8)$$

Nótese, que cada magnitud fundamental tiene su homónimo del otro lado de la igualdad, por tanto, se obtiene un sistema de ecuaciones 3 por 3, que al resolverlo arroja como resultado los valores numéricos de cada α . Los valores para cada α son:

$$\alpha_1 = 1$$

$$\alpha_2 = 1$$

$$\alpha_3 = -1$$

Con los valores anteriores, se concluye la primera relación adimensional (7):

$$\pi_1 = \frac{V \rho D}{u} \quad (9)$$

Nótese, que la primera relación adimensional es un número conocido y ya establecido, como: Número de Reynolds.

b) Relación adimensional π_2

Ahora se debe encontrar la segunda relación, siguiendo el mismo procedimiento de las tres variables físicas a repetir en el prototipo y la variable restante, como se muestra a continuación (10):

$$\pi_2 = V^{\alpha_1} \rho^{\alpha_2} u^{\alpha_3} g \quad (10)$$

Al reemplazar las magnitudes fundamentales, se tiene (11):

$$\pi_2 = [L T^{-1}]^{\alpha_1} [M L^{-3}]^{\alpha_2} [M L^{-1} T^{-1}]^{\alpha_3} [L T^{-2}] = L^0 T^0 M^0 \quad (11)$$

Al plantear el sistema de ecuaciones 3 por 3, y resolverlo, se obtiene los valores numéricos de α ; dichos valores son reemplazados en (10) para encontrar la segunda relación adimensional vista de la siguiente forma (11):

$$\pi_2 = \frac{u g}{v^3 \rho} \quad (11)$$

Como π_2 es adimensional, puede verse como:

$$\pi_2 = \frac{v^3 \rho}{u g} \quad (12)$$

El segundo número no es una relación adimensional establecida. Sin embargo, en la literatura del análisis dimensional para escalamiento empleada en el marco teórico

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

del presente capítulo, se expone que las relaciones halladas para π pueden o no ser conocido.

Para concluir los pasos de validación teórica de las dimensiones del tanque mediante análisis dimensional, los autores expresan, que las dos relaciones halladas deben mantenerse idénticas (tener el mismo valor numérico) tanto para modelo como prototipo, si se desea garantizar el mismo comportamiento de ascenso de microburbujas descrito por la ley de Stocks.

3 ANEXO C: ESTRUCTURACIÓN DE INFORMACIÓN PARA DISEÑO PLANTA DE LABORATORIO ECOFLOT PROTOTIPO TIPO CONTINUO

La planta de laboratorio Ecoflot prototipo es el producto del escalamiento y operaciones, que garantizan su dinámica. Aunque los autores desconocen diferentes factores, que interfieren en dicha dinámica, se propone para la planta de laboratorio una operación principal caracterizada por producción tipo lotes basada en tiempos de residencia. Sin embargo, se propone un segundo modo de operación tipo continuo, que permita tratar un número infinito de aguas residuales. Con base a la estructuración de información que propone ISA 88 para procesos por lotes, se identifican actividades y acciones de control para la planta Ecoflot prototipo de tipo continuo.

3.1 Control de proceso de planta de laboratorio tipo continuo Ecoflot prototipo

Para identificar las actividades fundamentales que rodean la dinámica de Ecoflot prototipo para producción continua, se emplea la jerarquización de información que sugiere la norma ISA 88. Por tanto, se obtienen acciones de proceso, que al terminar con la etapa de flotación, se inicia nuevamente en mezclado y almacenado para iniciar un ciclo sin fin. A continuación, se identifican las acciones fundamentales que se deben desarrollar en la planta modo continuo (ver tabla 4).

Tabla 4 Modelo de Control de Proceso de planta de laboratorio tipo continuo 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	Aislado del tanque de depósitos de remoción
			Conexión directa por tubería entre tanque de depósito y tanque flotación (Ecoflot prototipo)
			Configurado del tiempo inicial de residencia
	Mezclado y Almacenado	Recepción de Insumos	Recibido de Insumos
			Preparado de los insumos
			Inspección de los insumos
		Mezclado y Calentado del agua a tratar	Depósito de los insumos
			Mezclado de los insumos
			Calentado de la mezcla
		Medición de la temperatura del agua a tratar	
Envío del agua a tratar	Envío del agua a tratar		

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

Flotación	Recepción del agua a tratar	Presurización del equipo
		Depósito del agua a tratar
	Remoción de los residuos	Recirculación del agua
		Generación de burbujas
		Flotación de partículas
		Desnatado de los residuos
	Envío del agua tratada y residuos	Envío del agua tratada y residuos
		Continua con acciones de proceso de operación mezclado y calentado

Fuente: Fuente propia, Abril de 2016.

Nota 1: aunque las actividades planteadas son genéricas, note que la producción tipo continuo para la planta de laboratorio tiene una acción de proceso, que conlleva a un tiempo de espera mientras transcurre el tiempo del primer ascenso de la cama inicial de burbujas.

Nota 2: el modelo físico, llamado así para procesos de producción por lotes, hace referencia a los equipos que desarrollaran las acciones de control fundamentales. Por tanto, los autores proponen una planta, que con los mismos equipos e instrumentos funcione para los dos tipos de producción.

3.2 Control procedimental de planta de laboratorio tipo continuo Ecoflot prototipo

La información plasmada para determinar el control procedimental para cada etapa o unidad de la planta, hace la diferencia con la dinámica propuesta para producción por lotes. Por tanto, es de vital importancia para identificar las acciones que gobernarán el modo de producción. A continuación, se identifica el modelo de control procedimental para Ecoflot prototipo tipo continuo (ver tabla 5).

Tabla 5 Control de Procedimiento de planta de laboratorio Ecoflot prototipo tipo continuo

Procedimiento	Procedimiento de Unidad	Operación	Fase
Flotación en planta de laboratorio Ecoflot prototipo	Configurado	Configuración tipo continuo	Abrir válvula que conecta tubería externa de remoción con tanque de remoción
			Cerrar válvula que conecta tanque Ecoflot con tanque deposito
			Configurar la apertura de las válvulas internas de remoción tras 78 segundos de inicio de recirculación
	Mezclado y Almacenado	Recepción de insumos	Recibir continuamente agua natural con crudo

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

			a una concentración de 80 ppm o más
			Inspeccionar agua con crudo
		Mezclar y Calentar el agua a tratar	Depositar el agua a tratar en el tanque de deposito
			Agitar la mezcla durante 5 min
			Calentar la mezcla a 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
	Flotación	Recepción del agua a tratar	Presurizar el equipo de flotación con gas Blanket a 80 psi
			Depositar $\sim 2,8 m^3$ de agua a tratar en el tanque de flotación a una presión de 85 psi
		Remover los residuos	Recircular $1,76657 \times 10^{-4} m^3$ del agua a tratar del tanque de flotación a una presión de ~ 85 psi
			Generar burbujas de $\sim 300 \mu m$ de diámetro
			Esperar 78 segundos que termine primera flotación de partículas
			Abrir válvulas internas de tubería de desnatado
			Desnatar agua y residuos
			Abrir válvula de salida agua tratada
Enviar el agua tratada	Transferir desnatarado a tanque de depósito		
	Transferir agua tratada al tanque de depósito		
	Inicia acciones de control de la unidad mezclado y calentado		

Fuente: Fuente propia, Abril de 2016.

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

Nota 1: la operación de configuración tipo continuo, se identifica al suponer un tiempo inicial t_0 , en donde se pone en marcha la planta. Asimismo, el final de la tabla, hace referencia a iniciar un ciclo que no tenga fin y por tanto surja la operación continua.

Nota 2: si se analiza la dinámica de operación de la planta para configuración tipo continua, nótese que las partículas removidas salen constantemente con grandes cantidades de agua, lo que conlleva a una pérdida de agua a tratar considerable. Asimismo, el caudal de entrada a ingresar tras la primera flotación, debe ser proporcional (teóricamente igual) a la suma del caudal de salida de desnate y de agua tratada, lo que conlleva a diseñar un control proporcional estricto (en términos económicos costoso), así como implementar programadores lógicos programables con procesadores eficientes, sensores con varias cifras de exactitud y transmisores con el menor tiempo de respuesta posible, de tal forma que no sea vea afectado el rendimiento de la planta en dicha operación. Por tanto, todo ello implica una implementación costosa e ineficiente, en términos económicos.

Nota 3: si bien el modo de operación tipo continuo no es rentable, si puede ser medianamente eficiente desde el punto de vista operativo, debido a que la planta es capaz de tratar agua sin parar. Sin embargo, para alcanzar el porcentaje de remoción de la planta en operación por lotes, se debe pasar aproximadamente 90 veces más por sistema de flotación.

4 ANEXO D: INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPOS DE LA PLANTA

Para la selección de la instrumentación y equipos, se tiene en cuenta las condiciones de operación que requiere la planta Ecoflot prototipo para su funcionamiento. Las unidades que conforman la planta funcionan en gran parte bajo el mando de un PLC, el cual es empleado para el control de nivel (LC), el control de temperatura (TC), el accionamiento de la bomba de recirculación y las válvulas solenoides.

Tabla 6 Controlador lógico programable

Especificación técnica	Descripción	Figura 3 PLC	
Modelo	Micrologix 1100		
Marca	Allen Bradley		
E/S	Entradas		10 digitales
			2 analógicas
	Salidas		6 digitales
Memoria de programa de usuario	4 K		
Memoria de datos de usuario	4 K palabras	Fuente [5].	
Características			
Pantalla de cristal incorporada			
Capacidad de añadir módulos digitales, analógicos, de RTD y de termopar			
Fuente. [5].			

4.1 Unidad de Mezclado y Almacenado

En esta unidad, se presenta el control de temperatura y el accionamiento del motor de mezclado. A continuación se expone cada una de los equipos e instrumentación empleada para el desarrollo de esta unidad:

- Mezclado de Insumos

El mezclado de los insumos que componen el agua a tratar, será realizado por un agitador activado por un tiempo *de cinco minutos* a través del operario. El agitador cuenta con diferentes escalas de velocidad y diversos perfiles, que permiten mezclar uniformemente diferentes volúmenes; también será útil en aplicaciones en donde se requieran mezclas de líquidos sencillos con presencia de sólidos suspendidos (ver tabla 7).

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

Tabla 7 Agitador

Especificación técnica		Descripción		Figura 4 Agitador
Modelo		VR6A-054		
Marca		NOVATEC MIXERS		
Características		Ø Propela	540 mm	
		Long. Max. Eje	1600 mm	
		Peso Aprox.	40 Kg	
Aplicación				
Tanque				
Ø Diámetro		Volumen		
Min (m)	Max (m)	Min (m³)	Max (m³)	
0,9	1,8	0,7	4,3	Fuente [6].

Fuente. [6].

- Control de temperatura

Este sistema de control, se compone por el sensor de temperatura, un transmisor indicador de temperatura, un transductor de temperatura y la resistencia calefactora encargada de calentar el agua a tratar a 122°F. El comportamiento de estos elementos será gobernado por el PLC.

Sensor de temperatura (ET 101-1)

Este sensor estará ubicado dentro del tanque de depósito con el fin de tomar la temperatura del agua a tratar (122°F o 50°C) y cumplir con las condiciones de operación. El sensor seleccionado tiene como ventaja trabajar bajo condiciones presurizadas, ya que cuenta con la instalación de un termopozo de acero inoxidable para que su desempeño no se afecte (ver tabla 8).

Tabla 8 Sensor de temperatura (ET 101-1)

Especificación técnica		Descripción		Figura 5 ET 101-1
Modelo		Sensor de temperatura de punto único Rosemount 65		
Marca		Rosemount		
Precisión		DIN clase B (estándar). RTD de 100 Ω a 0 °C, α = 0,00385 C ⁻¹		
Rango de temperatura de medición		Estándar: de -50°C a 450°C Opcional: de -195°C a 600°C		
Tipo de elemento		Elemento de punto Pt 100 según EN 60751. Diseño de elemento individual de 4 hilos.		
Longitud de inmersión		De 500 mm a 1000 mm		Fuente [7].

Fuente. [7].

Transmisor indicador de temperatura (TIT 101-1).

El transmisor recibirá la señal proveniente del sensor, la leerá y a su vez, la enviara al controlador de temperatura. El instrumento seleccionado permitirá observar una primera lectura de la temperatura del agua a tratar (ver tabla 9).

Tabla 9 Transmisor indicador de temperatura (TIT 101-1)

Especificación técnica	Descripción	Figura 6 TIT 101-1
Modelo	3144P	
Marca	Rosemount	
Señal de salida	4 - 20mA	
Rangos de entrada	-200 °C a 850 °C	
Span minimo	10°C	
Precisión	±0,02%del Span	
Elementos de entrada		
Sensor	Estándar	Fuente [8].
Termoresistencia Pt 100 ($\alpha=0,00385$)	IEC 751	

Fuente. [8].

Resistencia calefactora

Este dispositivo será el encargado de elevar la temperatura del agua a tratar a 122°F o 50°C. Para llevar a cabo esta fase del proceso, se empleará un calentador de brida utilizados comúnmente en aplicaciones químicas, petroleras y tratamientos de agua. La ventaja de emplear este instrumento radica en utilizar controles digitales para alcanzar las temperaturas esperadas a determinada precisión, además cuenta con facilidad de instalación dentro de tanques y proporciona la opción de diseño con las especificaciones requeridas: como tamaño (ver tabla 10).

Tabla 10 Calentador de brida

Especificación técnica	Descripción	Figura 7 Calentador de Brida	
Marca	WATTCO		
Tamaños (pulgadas)	2- 42		
Calentador de brida de 2 1/2"			
Kilovatios	5		
Longitud de Inmersión	406 mm		
Voltajes	208		1 o 3 Fases
	240		
	480		
	600		
Vataje	61.7 W/in ²	Fuente [9].	

Fuente. [9].

4.2 Unidad de Flotación

En la unidad de flotación, se empleará el control de nivel, el accionamiento de la bomba de recirculación y la apertura y cierre de válvulas solenoides. A continuación, se expone cada una de los equipos e instrumentación empleada para el desarrollo de esta unidad:

- Control de Nivel

El sistema de control de nivel, se implementará con el fin de realizar una buena remoción de sólidos garantizando la altura adecuada del agua a tratar. Está compuesto por un interruptor de nivel por alta, un transmisor indicador de nivel, el controlador de nivel, el transductor de frecuencia y la bomba de transferencia.

Interruptor de nivel por alta (LSH 101-2)

Está ubicado a 1,2 m de altura en el tanque de flotación, una vez el agua a tratar llegue el nivel requerido este se activa y envía la señal al controlador. El interruptor cumple con los requerimientos deseados para el buen funcionamiento de la unidad en lo que concierne a presión y temperatura del proceso dentro de esta (ver tabla 11).

Tabla 11 Interruptor de nivel por alta (LSH 101-2)

Especificación técnica	Descripción		Figura 8 LSH 101-2
Modelo	SC750DC		
Marca	SITRON		
Producto medido	Sólidos y líquidos		
Precisión alta	± 3mm		
Presión de proceso	Min (psi)	0	
	Max (psi)	145,04	
Temperatura de proceso	Min (°C)	-10	
	Max (°C)	80	
			Fuente [10].

Fuente. Especificaciones técnicas Interruptor de nivel por alta.

Transmisor indicador de nivel (LIT 101-2)

El transmisor será empleado para tener supervisión del nivel del agua a tratar dentro del tanque de flotación. Este dispositivo seleccionado garantiza precisión y fiabilidad en la medición de nivel directa y es el adecuado para trabajar en equipos donde se presentan obstáculos dentro del líquido. También da la posibilidad de ser empleado en procesos con presencia de líquidos como petróleo, gasolina u otros hidrocarburos, además cuenta con las

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

especificaciones adecuadas para cumplir con las condiciones de operación que requiere la unidad (ver tabla 12).

Tabla 12 Transmisor indicador de nivel (LIT 101-2)

Especificación técnica	Descripción	Figura 9 LIT 101-2
Modelo	Transmisor de nivel por radar sin contacto de dos hilos	
Marca	Rosemount serie 5401	
Señal de salida	4 – 20 mA	
Temperatura de proceso (°C)	-40 – 150	
Presión de proceso (psi)	-14 – 232	
Precisión	± 10 mm	
Rango máximo de medición (m)	15	Fuente [11].

Fuente. [11].

Bomba (PUMP 101-2)

La bomba se emplea con el fin de transferir el agua a tratar desde el tanque depósito hasta el tanque de flotación. La máquina seleccionada tiene la capacidad de trabajar con líquidos a temperaturas hasta de 70°C en la industria petroquímica, posee una succión (diámetro de brida de la bomba) y descarga de 2", por lo cual se recomienda instalar en la parte de descarga de la bomba una ampliación concéntrica ya que debe ser acoplada a la tubería PP1 que posee un diámetro de 5", por último cabe resaltar que la bomba también cumple con el requerimiento de caudal de ingreso al tanque de flotación (ver tabla 13).

Tabla 13 Bomba (PUMP 101-2)

Especificación técnica	Descripción	Figura 10 PUMP 101-2
Modelo	HE 2 50-1	
Marca	Barnes	
Ø Succión	2"	
Ø Descarga	2"	
Caudal máximo (m³/s)	0,3483	
Altura máxima (mca)	53	
Potencia (hp)	5	
Voltaje	220	
Velocidad del motor (rpm)	3600	
Frecuencia (Hz)	60	
		Fuente [12].

Fuente. [12].

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

- Accionamiento de la bomba de recirculación

El accionamiento de la bomba se realiza a través del controlador, esta será la encargada de recircular el agua en el tanque de flotación, con el fin de dar inicio a la generación de microburbujas y por ende la remoción de residuos dentro de la unidad.

Bomba de recirculación (PUMP 101-3)

La máquina seleccionada tiene la capacidad de trabajar con líquidos a temperaturas hasta de 70°C en la industria petroquímica, posee una succión y descarga de 4" con lo que se garantiza los requerimientos de diseño de la planta. El caudal que presenta la bomba está dentro del rango establecido en las condiciones de operación de la planta (ver tabla 14).

Tabla 14 Bomba de recirculación (PUMP 101-3)

Especificación técnica	Descripción	Figura 11 PUMP 101-3
Modelo	HE 3 200-2	
Marca	Barnes	
Ø Succión	4"	
Ø Descarga	4"	
Caudal máximo (m³/s)	0,5678	
Altura máxima (mca)	163	
Potencia (hp)	20	
Voltaje	220/440	
Velocidad del motor (rpm)	3600	
Frecuencia (Hz)	60	

Fuente. [12].

Accionamiento de válvulas

Las válvulas solenoides y manuales son empleadas en la planta con el fin de obtener precisión y control de las condiciones de operaciones que se requieren para la ejecución del proceso, condiciones como: la presión dentro del tanque de flotación, el desnate de residuos y el flujo del agua a tratar y agua tratada.

Válvula solenoide SFV 101-4

La válvula seleccionada es una válvula normal cerrada (NC) es decir que en el instante que sea energizada la solenoide esta se abre. Recibe una señal de control ya sea de tensión de 0 a 10 VCC o una señal de corriente de 4 a 20 mA. Gracias a este tipo de características permite mantener las condiciones de operación de la planta, ya que debe permanecer cerrada durante el tiempo de residencia y después abrirse para dar salida a los residuos. Además, posee una conexión BSP de ½" ideal para ser instalada en PP9 (ver tabla 15).

Tabla 15 Válvula solenoide (SFV 101-4)

Especificación técnica	Descripción	Figura 12 SFV 101-4	
Modelo	EV220B-15		
Marca	Danfos		
Conexión BSP	½"		
Factor KV (m³/h)	4,0		
Presión diferencial (psi)	Min		4,3
	Max		235
Temperatura (°C)	Min		-30
	Max	140	

Fuente [13].

Fuente. [13].

Válvula solenoide SFV 101-3

También se selecciona una válvula normal cerrada (NC), ya que va a ser empleada para dar paso al agua que debe ser recirculada. Esta se activara a través del controlador en el instante que el agua a tratar llegue al nivel requerido dentro del tanque de flotación. La conexión de 4" que posee también permite que sea acoplada a esta fase del proceso (ver tabla 16).

Tabla 16 Válvula solenoide (SFV 101-3)

Especificación técnica	Descripción	Figura 13 SFV 101-3	
Modelo	EVSI-80		
Marca	Danfos		
Conexión BSP	4"		
Factor KV (m³/h)	75		
Presión diferencial (psi)	Min		3,7
	Max		150
Temperatura (°C)	Min		-25
	Max	90	

Fuente [13].

Fuente. [13].

Válvula solenoide SFV 101-2

La válvula seleccionada es una válvula normal abierta (NA) la cual recibe una señal de tensión de 0 a 10 VCC o una señal de corriente de 4 a 20 mA, también posee un diámetro de conexión de 5". Características como las anteriores permiten que este tipo de válvula sea instalada en la tubería PP1 ya que no permitiría el paso del agua a tratar una vez esta llegue al nivel estipulado dentro del tanque de flotación (ver tabla 17).

Tabla 17 Válvula solenoide (SFV 101-2)

Especificación técnica	Descripción	Figura 14 SFV 101-2	
Modelo	636-03		
Marca	CLA-VAL		
Conexión	5"		
Factor KV (m³/h)	130		
Presión diferencial (psi)	Min		3,7
	Max		150
Temperatura (°C)	Min	-25	
	Max	90	

Fuente [14].

Fuente. [14].

- Instrumentación adicional

Indicadores de presión de gas

Los manómetros son utilizados en la planta con el fin de que el operario pueda supervisar el suministro de gas a la presión requerida en los tanques, y así garantizar que estos estén presurizados en el rango requerido para cumplir con las condiciones de operación de la planta, cuyo rango esta entre 0 – 100 psi (ver tabla 18).

Tabla 18 Manómetro de presión de gas (IP)

Especificación técnica	Descripción	Figura 15 PI	
Modelo	1001		
Marca	DE WIT		
Elemento	Tubo bourdon de bronce		
Rango	Kg/ cm ²		0 – 7
	psi		0 - 100
Exactitud	+/- 1.6% del total de la escala		
Tamaño	ø 63 mm (2 1/2"),		

Fuente [15].

Fuente. [15].

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

Indicadores de presión de flujo de agua

El manómetro de presión de agua le permite al operario supervisar la presión del agua en recirculación y así garantizar que esta se encuentre dentro del rango (0 – 80 psi) que se requiere al ingreso del subsistema de generación de microburbujas. El instrumento seleccionado es el adecuado para este tipo de tareas (ver tabla 19).

Tabla 19 Manómetro de presión de agua recirculada (PI)

Especificación técnica	Descripción		Figura 16 PI
Modelo	11		
Marca	DE WIT		
Elemento	Tubo bourdon de bronce		
Rango	Kg/ cm ²	0 – 11	
	psi	0 - 100	
Exactitud	+/- 2% del total de la escala		
Tamaño	ø 63 mm (2 1/2")		Fuente [15].

Fuente. [15].

Indicadores de flujo de agua

El indicador de flujo es empleado con el propósito de que el operario de la planta supervise el flujo de agua que es recirculado. El instrumento seleccionado cumple con las condiciones de diseño ya que posee un diámetro de 4" el cual es adecuado para ser acoplado a la tubería PP6 (ver tabla 20).

Tabla 20 Indicador del agua recirculada (FI)

Especificación técnica	Descripción		Figura 17 FI
Modelo	ENVIROMAG/OPTIFLUX		
Marca	KROHNE		
Diámetro	4"		
Observaciones			
Manejo de fluidos con sólidos en suspensión y agua potable			Fuente [16].
Empleado en tratamiento de aguas, pulpa y papel			

Fuente. [16].

Válvulas manuales

Las válvulas de bolas son seleccionadas ya que ofrecen buena capacidad de cierre y son prácticas de accionar pues solo es necesario girar la manivela 90°. La apertura de la válvula es del mismo tamaño que en el interior de las tuberías lo cual provoca una muy pequeña caída de presión. Este tipo de válvula es para uso exclusivo en la posición totalmente abierta o cerrada. Las

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

características anteriores son algunos aspectos por los cuales son las indicadas para ser instaladas en las tuberías PP5, PP7 y PP8. En la tabla 21 se pueden observar otras características relevantes de las válvulas. Cabe señalar que debido a que el caudal que se presentan en estas tuberías es muy pequeño se recomienda que las válvulas sean mandadas a diseñar con base a este criterio.

Tabla 21 Válvulas manuales (FHV 101-2, 101-3, 101-4)

Especificación técnica		Descripción	Figura 18 FHV
Modelo		KK	
Marca		RICHTER	
Tipo		Bola	
Material		De hierro	
Presión operativa (psi)	Min	0	
	Max	236,6	
DN (mm)	Min	15	
	Max	200	
			Fuente [17].

Fuente. [17].

Válvula de seguridad de presión (PSV)

Con el fin de reducir los peligros asociados a trabajar con equipos presurizados y minimizar la contaminación que podría generarse al ingresar aire en el espacio de gas del tanque de flotación, es necesaria la instalación de una válvula de seguridad de presión de gas en la parte superior del tanque. El instrumento seleccionado para cumplir con el objetivo anterior es una válvula de Blanketing, la cual es un dispositivo que detecta la presión dentro del tanque y controla el gas inerte en el espacio de gas para que la presión del tanque se pueda mantener dentro de un rango aceptable (ver tabla 22).

Tabla 22 Válvula de seguridad de presión (PSV)

Especificación técnica		Descripción	Figura 19 PSV
Modelo		PROTECTO SEAL	
Marca		Serie N° 20	
Entrada y salida (in)		1	
Accionamiento		Por piloto	
Capacidad del tanque (m³)	Min	10	
	Max	28,6	
Presiones de gas (psig)	Min	20	
	Max	200	
Observaciones			
Conexiones de entradas y salidas opcionales			
Mantenimiento completo en campo			Fuente [18].

Fuente. [18].

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

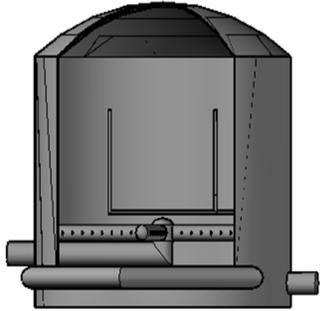
- Equipos de la planta

Los módulos de equipo a emplear dentro de cada unidad son seleccionados teniendo en cuenta las condiciones de diseño y operación que requiere la planta.

- ✓ Unidad de flotación

El equipo utilizado en esta unidad es un tanque que debe ser herméticamente cerrado y poseer las dimensiones correspondientes para poder ser instalados los subsistemas de suministro de agua, generación de burbujas y desnate e instrumentación necesaria para el desarrollo de la unidad de flotación (ver tabla 23).

Tabla 23 Tanque de flotación (TK 101 - 2)

Especificación técnica	Descripción	Figura 20 TK 101-2	
Material	Acero Inoxidable		
Capacidad (m³)	3,64		
Altura (m)	Tanque		1,3
	Cabezal		0,4
	Total		1,7
Geometría	Cilíndrico Horizontal		
Diámetro (m)	1,8		
Grosor de la paredes (mm)	7		
Presión Interna (psi)	Min		0
	Max		100
Temperatura del líquido a almacenar (°C)	Min	0	
	Max	80	
Observaciones		Fuente. Propia, abril 2016	
El tanque posee un cabezal con una altura de 0,4 m, el cual es soldado al tanque, es decir que esta medida hace parte de la altura total del tanque.			

Fuente. Fuente. Propia, abril 2016.

- ✓ Unidad de almacenamiento y mezclado

El módulo de equipo empleado en esta unidad es un tanque herméticamente cerrado, el cual debe tener una capacidad mayor al de flotación, en este tanque van a ser instalados el calentador de brida y el agitador con el fin de acondicionar el agua a tratar. También posee una división en su interior para poder almacenar en un lado el agua a tratar y en el otro el agua tratada.

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

✓ Suministro de gas Blanket

Para el buen funcionamiento de la planta se requiere que los equipos estén presurizados, por lo cual es necesario utilizar un suministro de gas que posea la suficiente capacidad de cubrir con los equipos de cada unidad.

5 BIBLIOGRAFIA

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] L. V. Streeter, *Mecánica de fluidos*, Uno. Michigan, Estados Unidos: LITO EDICIONES OLIMPIA S.A, 1972.
- [4] M. Robert, *Mecánica de fluidos*, Sexta Edic. México, 2006.
- [5] Rockwell Automation, "Manual PLC Micrologix." 2008.
- [6] "Agitadores industriales estándar Serie VR." pp. 1–6.
- [7] Rosemount, "Rosemount Sensores de temperatura de múltiples puntos y de nivel de agua 565 / 566 / 765 para sistemas de medición en tanques." 2014.
- [8] Emerson, "Transmisor De Temperatura 3144P," *Datos Tec. del Transm.*, vol. 1, no. 1, p. 23, 2010.
- [9] "www.wattco.com." .
- [10] EGE, "Special Sensors_Level Sensors." .
- [11] Emerson, "Rosemount serie 5400: hoja de datos del producto." pp. 2–3, 2010.
- [12] I. Construcci, I. Minera, I. Petroqu, and I. Qu, "Bombas Alta presión con motor eléctrico HE 2 50-1." pp. 21–22, 2014.
- [13] Danfos Industrial Automation, "Catálogos Danfos." .
- [14] VIGNOLA, "Instrumentación Valvulas Solenoides," *Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015*, vol. 1. 2015.
- [15] DEWIT, "Orientación para la selección e instalación de manómetros." 1985.
- [16] KROHNE, "MEDIDORES DE FLUJO." .
- [17] RICHTER, "Richter_heavy_duty ball valves." .

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

- [18] PROTECTO SEAL, "Valvula de blanketing con accionamiento por piloto_SERIE 20." pp. 1-8.