



Análisis y evaluación de la incidencia de las microburbujas en el tratamiento de agua, a través del desarrollo y estudio de un sistema de operación continua para tratamiento primario de aguas residuales.

**Johan Ferney Calderón Arévalo Cod.10451511672
Marlon Styc Tarazona Castillo Cod.11481522000**

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Bogotá, Colombia
2020

Análisis y evaluación de la incidencia de las microburbujas en el tratamiento de agua, a través del desarrollo y estudio de un sistema de operación continua para tratamiento primario de aguas residuales.

Johan Ferney Calderón Arévalo Cod.10451511672
Marlon Styc Tarazona Castillo Cod.11481522000

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Mecánico
Ingeniero Mecatrónico

Director: Carlos Arturo García Gómez carlosarturo81@uan.edu.co

Co-Director: John Fredy Ríos Rojas johnri@uan.edu.co

Línea de Investigación:

Diseño, construcción y simulación de sistemas electromecánicos.

Grupo de Investigación:

REM - Research of Energy and Materials

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2020

A mis padres

*“Si tuviera la suerte de alcanzar alguno de mis
ideales sería en nombre de toda la humanidad”.*

-Nikola Tesla

Resumen

El presente proyecto muestra el diseño de un prototipo de sistema de flujo continuo para el tratamiento primario de aguas residuales. Este sistema se compone de cuatro etapas, en el que se evalúa la aplicación de los tratamientos primarios involucrados, como la sedimentación, con el diseño y desarrollo de un hidrociclón, adicionando la generación de microburbujas, que conlleva, al diseño propio y elaboración de dos prototipos, los cuales se desarrollaron a partir de un filtro microporoso para agua, al que ingresándole aire y agua a presión genera burbujas.

Las burbujas en la superficie del filtro se cortan para generarlas a tamaños inferiores a 100 micras, comprobando esta condición con imágenes tomadas en el lente de un microscopio gracias al análisis de imágenes en Matlab, permitiendo diseñar un sistema de bajo costo, demostrando presencia de sus características visuales, en agua limpia, por ejemplo, como lo son; una notoria nube blanquecina y un tipo de efervescencia.

Sumado a esto hay que decir que se muestra su ayuda para el tratamiento primario de aguas contaminadas con ciertos materiales, donde también enseña indicios de acumulación, aglomeración y separación de sólidos en suspensión y disueltos, los resultados se valoran de acuerdo con la turbidez y coloración del agua resultante respecto a sus anteriores etapas.

Palabras clave: Microburbujas - Sedimentación - Tratamiento primario de aguas - Hidrociclón - Turbidez - Coloración del agua.

Abstract

This project wants to show the design of a prototype of a continuous flow primary treatment system. Thus, this system is composed in principle by four stages in which the application of the primary treatments involved, such as sedimentation, is evaluated with the design and development of a hydrocyclone, adding the generation of microbubbles, which also involves the own design and elaboration of two prototypes generators, which were designed from a microporous filter for water that generates air bubbles when entering air and that through the use of pressurized water.

These bubbles are cut to generate sizes less than 100 microns, with measurements under a microscope thanks to the image analysis in Matlab, allowing the design of a low-cost system,

In addition to this, it must be said that its help is shown for the primary treatment of waters contaminated with certain materials, where it also shows signs of accumulation, agglomeration and separation of suspended and dissolved solids, the results are evaluated according to turbidity and coloration of the resulting water with respect to its previous stages.

Keywords: Microbubbles- Sedimentation - Primary water treatment - Hydrocyclone - Turbidity – Water coloring

Contenido

	Pág.
Resumen	4
Abstract	5
Contenido	6
Lista de figuras	10
Lista de tablas.....	13
Lista de símbolos y abreviaturas.....	14
Símbolos con letras latinas	14
Símbolos con letras griega.....	14
Subíndices.....	15
Introducción	16
Justificación	17
Alcance	18
Objetivos.....	18
Objetivo general	18
Objetivos específicos	18
1. Marco teórico	20
1.1 Aguas residuales	20
1.1.1 Calidad del agua.....	20
1.1.2 Características del agua residual.....	21
1.1.3 Contaminantes sólidos	21
▪ En suspensión o sedimentables	21
▪ Inorgánicos disueltos	21
1.1.4 Sólidos totales	21
1.1.5 Caracterización de aguas residuales.....	22
▪ Métodos físico-químicos	22

▪ Métodos biológicos	22
1.1.6 Calidad del agua en Colombia.....	22
1.1.7 Políticas de deposición y tratamientos de aguas en Colombia.....	23
▪ Norma de vertimientos.....	23
▪ Norma de reúso	23
1.1.9 Tratamientos primario de aguas	23
▪ Clases de tratamientos primarios.....	23
1.2 Sedimentadores.....	26
1.2.1 Tipos de sedimentadores	26
▪ Los desarenadores	26
▪ Sedimentadores de flujo horizontal.....	27
▪ Unidades de flujo vertical.....	27
▪ Sedimentador de flujo inducido.....	28
▪ Sedimentador hidrociclón	28
1.2.2 Fase de diseño del hidrociclón seleccionado.....	30
▪ Fase de prototipado.....	31
1.3 Microburbujas	33
1.3.1 Características de las microburbujas.....	33
▪ Superficie específica.....	33
▪ Presión interna alta.....	33
1.3.2 Aplicaciones de las microburbujas.....	34
▪ Eliminación de impurezas de aguas residuales	34
▪ Remoción de sedimentos y lodos	34
1.4 Software de simulación y procesamiento de datos.....	35
1.4.1 Matlab	35
▪ Image processing toolbox	35
1.4.2 Software CAD.....	35
▪ Herramientas	36
▪ Simulación en SolidWorks	36
1.5 Sistemas continuos.....	36
1.5.1 Sistema de producción continua	36
1.6 Antecedentes del tratamiento de aguas residuales y microburbujas	37
1.6.1 PTAR-EI salitre.....	37

▪ Fase I	37
1.6.2 PTAR-San Fernando	37
▪ Tratamiento preliminar	37
▪ Tratamiento primario.....	38
▪ Tratamiento secundario	38
1.6.3 Uso de microburbujas con ozono para tratamiento de aguas residuales	38
2. Desarrollo del proyecto.....	40
2.1 Análisis de antecedentes	40
2.2 Descripción del proceso para el análisis de las microburbujas	41
2.2.1 Diseño de tratamiento primario.....	42
2.3 Microburbujeador	44
2.3.1 Diseño de microburbujeador.....	44
2.3.2 Microburbujeador de flujo de agua helicoidal.....	44
2.3.3 Microburbujeador de flujo de agua lineal vertical	45
2.3.4 Construcción microburbujeador	46
▪ Microburbujeador de flujo de agua helicoidal	46
▪ Microburbujeador de flujo de agua lineal vertical	47
2.4 Diseño del hidrociclón.....	48
2.4.3 Fase de construcción	50
2.5. Diseño de control de nivel on/off	51
2.5.1 Diagrama de conexión eléctrica 1.....	52
2.5.2 Simulación de funcionamiento del control de nivel.....	53
2.6 Construcción sistema de tratamiento continuo	54
2.6.1 Desarrollo del sistema continuo.....	54
3.Evaluación de resultados	58
3.1 Resultado del proceso de desarenado por hidrociclón	58
3.1.1 Resultados visuales con sedimento de arena.....	58
3.1.2 Resultados visuales con sedimento de café tostado.....	59
3.1.3 Resultados visuales con sedimento de Lodo	60
3.2 Generación y medición de microburbujas	62
3.2.1 Generación de microburbujas artesanal	62
▪ Medición de las microburbujas.....	62

3.2.2 Generación de microburbujas con prototipos.....	68
▪ Generación de microburbujas helicoidal	68
▪ Generación de microburbujas laminar	68
3.3 Evidencia del beneficio del uso de las microburbujas en sedimentos.....	70
3.3.1 Resultados de la aplicación de micro burbujas en arena	70
3.3.2 Resultados de la aplicación de microburbujas en sedimentos de café.....	71
3.3.3 Resultados de la aplicación de microburbujas en sedimentos con lodo.....	72
3.3.4 Aplicación de microburbujas a los sedimentos seleccionados	73
4.Conclusiones y recomendaciones	74
4.1 Conclusiones	74
4.2 Recomendaciones	76
Bibliografía	77

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1: Proceso de sedimentación	24
Figura 2: Flotación por aire disuelto.....	24
Figura 3: Floculación	25
Figura 4: Cribado.....	25
Figura 5: Desarenador.....	26
Figura 6: Sedimentador horizontal.....	27
Figura 7: Sedimentador vertical.....	28
Figura 8: Sedimentador flujo inducido, izquierda vista lateral, derecha vista superior.....	28
Figura 9: Sedimentador hidrociclón	30
Figura 10: Geometría del hidrociclón.....	30
Figura 11: Sedimentador cono tendido.....	31
Figura 12: Diferentes modelos de sedimentadores de cono pronunciado.....	32
Figura 13: Sedimentador cilíndrico	32
Figura 14: Presiones de burbujas.....	33
Figura 15: Disposición del sistema continuo.....	41
Figura 16: Modelado de sistema de tratamiento ensamblado.....	42
Figura 17: Modelado de proceso de generación de microburbujas.....	43
Figura 18: Diseño y modelado del sistema, a la izquierda vista ortogonal frontal, a la derecha vista isométrica posterior	43
Figura 19: Filtro cerámico.....	44
Figura 20: Diseño de pieza de flujo helicoidal, a la izquierda con estilo visual-“aristas ocultas”, a la derecha modelado de ensamblaje con filtro	45
Figura 21: Diseño de cono laminar, a la derecha ortogonal posterior, a la izquierda vista ortogonal frontal	45
Figura 22: Diseño y ensamble de microburbujeador de flujo de agua lineal	46
Figura 23: Prototipo de microburbujeador de flujo helicoidal.....	47

Figura 24: Microburbujeador de flujo de agua lineal	47
Figura 25: Primer prototipo de sedimentador.....	48
Figura 26: Prototipo de sedimentador dos, vista frontal y ortogonal.....	50
Figura 27: Sedimentador hidrociclón en uso.....	51
Figura 28: Diagrama eléctrico.....	52
Gráfica 1: Representación gráfica del primer ciclo de trabajo del sistema de control.....	53
Gráfica 2: Representación gráfica del primer ciclo de trabajo del sistema de control.....	54
Figura 29: Tanque almacenamiento de agua con sedimentos.....	55
Figura 30: Tanque T2.....	55
Figura 31: Montaje de la primera fase, vista ortogonal, vista superior	56
Figura 32: Tanque T3 de acrílico. vista ortogonal, vista superior	56
Figura 33: Montaje de segunda fase, vista lateral, vista superior.....	57
Figura 34: Sistema de tratamiento primario completo, vista ortogonal y vista superior	57
Figura 35: Muestras de salidas del hidrociclón, a la izquierda mezcla de agua y sedimentos para reinicio del proceso y a la derecha resultado desarenado de un paso por el hidrociclón	59
Figura 36: Diferencia en los sedimentos de café con un paso por el hidrociclón, al lado izquierdo salida de mezcla para reinicio de proceso y al lado derecho salida de agua tratada con un paso por hidrociclón.....	60
Figura 37: Muestra de cambio en resultados luego de un paso por el hidrociclón (lodo), lado izquierdo mezcla para reinicio de proceso, lado derecho resultado después de un paso por el hidrociclón.....	61
Figura 38: Muestra de resultados provenientes del hidrociclón permitiendo asentamiento de sedimentos.....	61
Figura 39: Prototipo artesanal de microburbujeador de flujo helicoidal	62
Figura 40: Pigmentación para medición con microscopio	63
Figura 41: Montaje para medición con microscopio.....	63
Figura 42: Captura de visualización con microscopio	64
Figura 43: Secuencia de tratamiento de imagen.....	64
Figura 44: Resultado de tratamiento de imagen	65
Figura 45: Imagen recortada y procesada en matlab.....	65
Figura 46: Ejecución del burbujeador helicoidal. Espumosis al lado izquierdo, nube blanquecina imagen del lado derecho	68
Figura 47: Microburbujeador laminar, a la izquierda agua en reposo y sin microburbujas, vs a la derecha agua con microburbujas	69

Figura 48: Efervescencia y espumosis al generar microburbujas	69
Figura 49: Aplicación de microburbujas a arena, al lado izquierdo mezcla extraída después de un paso por el hidrociclón y al lado derecho agua luego de un paso por el hidrociclón y aplicación de las microburbujas	70
Figura 50: Muestra del cambio luego de la aplicación de las microburbujas(café), al lado izquierdo muestra de un paso por el hidrociclón únicamente y al lado derecho muestra después de un paso por el hidrociclón y aplicación de microburbujas	71
Figura 51: Muestra de cambio en el tanque luego de aplicación de microburbujas, toda el agua en el tanque ya ha tenido un paso por el hidrociclón, al lado izquierdo la parte del tanque sin microburbujas, al derecho aplicación de microburbujas	72
Figura 52: Muestra del cambio después de microburbujas en lodo, Lado izquierdo mezcla luego de un paso por el hidrociclón, al lado derecho agua con un paso por el hidrociclón y tratada con microburbujas	72
Figura 53: Cambio progresivo en el agua con sedimentos por tierra común, cambios progresivos; al lado derecho mezcla para reinicio de procesos, en el centro mezcla luego de un paso por el hidrociclón y al lado izquierdo resultado luego de un paso por el hidrociclón y aplicación de microburbujas.....	73

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: Ventajas y desventajas de los hidrociclones	29
Tabla 2: Relaciones para la construcción de un hidrociclón:.....	31
Tabla 3: Medidas del primer prototipo realizado	48
Tabla 4: Medidas base del hidrociclón, las medidas presentadas están en mm	49
Tabla 5: Medidas finales sedimentador hidrociclón	51
Tabla 6: Datos del análisis de imagen	66
Tabla 7: Equivalencia de diámetros en micrómetros de las burbujas con diámetro de cable en píxel = 42 y diámetro de hilo de cobre = 110 μm	67

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Área	m^2	$\iint dx dy$
P	Presión	$\frac{N}{m^2}$	F/A
R	Radio	m	$\frac{P}{\pi * 2}$
N	Newton	N	$m * a$
G	Gravedad	$\frac{m}{s^2}$	$G * \frac{mm}{r^2}$

Símbolos con letras griega

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
α_{BET}	Factor de superficie	$\frac{m^2}{g}$	$(W_{F,wat})(A_{BET})$
δ	Derivada	-	$1 / \int x$

μm	Micrómetro	-	$1 * 10^{-6}m$
ρ	Densidad	$\frac{kg}{m^3}$	$\frac{kg}{V}$
H	Viscosidad	Pa.s	(P)(t)
σ	Tensión superficial	N/m	Sección 1.3
θ	Ángulo del cono	°	-

Subíndices

Subíndice	Término
Mb	Microburbujas
PTAR	Planta tratamiento agua residual
Di	Diámetro de alimentación
Do	Diámetro del vortex finder
Hvf	Altura del vortex finder
Hsc	altura de la sección cilíndrica
Du	Apex o salida inferior del hidrociclón
MNBs	Micro y/o nano burbujas

Introducción

El análisis del transporte de sedimentos es un componente crítico y esencial de cualquier proyecto que involucre la potabilización o el tratamiento de aguas. El sedimento producido en los afluentes de agua, provienen principalmente del área de captación debido a los procesos de erosión y deposición que ocurren continuamente. Los sedimentos se clasifican en sedimentos cohesivos como la arcilla y los sedimentos no cohesivos como la arena y los sedimentos gruesos [1].

Estudios encaminados hacia la conservación de litorales, evidencian resultados respecto a la modelización matemática de los sedimentos cohesivos, en los cuales se encontró que la sedimentación aumenta la turbidez, la alteración del litoral y la pérdida de vegetación sumergida, y de igual forma, se concluye que el exceso de turbidez en el agua potable puede ser motivo de preocupación para la salud. Así mismo, se debe eliminar la turbidez para evitar el crecimiento de patógenos en el sistema de distribución que puedan provocar brotes de enfermedades transmitidas por el agua [1][2].

Teniendo en cuenta estudios previos referentes al tratamiento de aguas subterráneas con la generación de microburbujas y las nanoburbujas (MNBs), con diámetros que van desde las decenas de nanómetros hasta las decenas de micrómetros, se demuestra que las burbujas presentan una rápida transferencia de masa, lo que ayuda a llevar sedimentos a la superficie para facilitar la extracción de estos, también persisten durante un largo tiempo en el agua y en algunos casos pueden disolverse en el agua, lo que mejora significativamente la concentración de oxígeno y proporciona un suministro continuo de oxígeno a los litorales, además, los resultados demostraron que el ozono producido por las MNBs, gracias a sus propiedades mejora enormemente las condiciones físico-químicas de las aguas subterráneas sin dejar rastro de sí y representa una tecnología innovadora para enmendar el daño de suelos, aguas subterráneas o contaminadas con productos orgánicos[2].

En la mayoría de las plantas de tratamiento de aguas, se considera como tratamiento primario a la extracción de sólidos y sedimentos ya sean de gran tamaño, sedimentable o en suspensión, grasas y espumas, para los cuales existen una gran variedad de procesos, unos con mejores resultados que otros, basados en desarenadores, sedimentadores, etc. [3].

El presente proyecto busca, por lo tanto, evaluar la incidencia de las microburbujas en el proceso de sedimentación de agua, para el tratamiento primario de aguas residuales, y dado que estudios previos demuestran su eficacia [4], se busca con este desarrollo de prototipo contribuir con la generación de un sistema de bajo costo con resultados aceptables.

Justificación

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), también conocidos como objetivos mundiales, son un llamado universal a la adopción de medidas para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad [5].

Dentro de estos ODS, más específicamente el “objetivo No. 6 - agua limpia y saneamiento”, busca, entre otras cosas, estimular la eficiencia hídrica y apoyar en tecnologías para el tratamiento y potabilización del agua. Gracias a este llamado del programa de las naciones unidas para el desarrollo -PNUD, empresas y universidades buscan desarrollar cada vez más soluciones a este problema que afecta al mundo entero. Surge, entonces, la necesidad de encontrar una manera de realizar el tratamiento de aguas residuales de bajo costo, y de esta manera, hacer posible y más fácil la descontaminación de fuentes hídricas [6].

Debido a esto el principal objetivo de este proyecto es comprobar las incidencias de las microburbujas en el agua contaminada con ánimo de encontrar alguna mejoría que permita encaminar el prototipo que aquí se diseñó hacia su implementación a nivel nacional en las plantas de tratamiento y potabilización de agua, ya que el motivo principal de tratar las aguas residuales es defender la salud pública y el medio ambiente. Si las aguas residuales no son tratadas y se vierten directamente a ríos, lagos o mares, es bastante probable introducir elementos de contaminación que acaben produciendo importantes daños ecológicos en el entorno ambiental y enfermedades de salud pública (causadas por virus y bacterias) en las personas y comunidades que entren en contacto con esas aguas contaminadas [7].

Alcance

El presente proyecto buscará determinar cualitativamente la mejora en el sistema de tratamiento primario de aguas residuales que incluyen dentro del proceso las microburbujas, frente a aquellos sistemas que no lo tienen, lo que permitirá realizar un estudio de los sistemas de tratamiento de aguas residuales y la incidencia de las microburbujas en el agua contaminada.

El desarrollo del sistema de tratamiento primario debe permitir, la separación de sedimentos no aplicables al tratamiento de microburbujas mediante el sedimentador hidrociclón y la recirculación de agua, y estudiar las características visuales del agua según los contaminantes que se ingresen al sistema, que se eligen según su utilidad y claridad en la obtención de resultados en las pruebas.

En el sistema de tratamiento los estudios están enfocados en calcular una aproximación de los diámetros de las microburbujas producidas y no la cantidad de aire disuelto. En el sistema tampoco se pretende evaluar la incidencia frente a los microorganismos que puedan estar presentes en la mezcla de agua-sedimentos, y solo se centrará al tratamiento, separación, aglomeración y facilidad de extracción de sedimentos en el tanque de tratamiento por microburbujas.

Objetivos

Objetivo general

Analizar la incidencia de la generación de microburbujas a través de la implementación de un sistema de funcionamiento continuo para el tratamiento primario de aguas residuales contaminadas con sedimentos comunes donde se evidencie si hay, o no, beneficios en el uso de las microburbujas y su impacto en el tratamiento de estas aguas.

Objetivos específicos

- Analizar los antecedentes frente a procesos involucrados en el tratamiento primario de aguas contaminadas con sedimentos comunes para la construcción del sistema.

- Diseñar las etapas del sistema de tratamiento primario de aguas contaminadas con sedimentos comunes en operación continua, incluyendo el diseño del sistema de generación de microburbujas.
- Diseñar el sistema de control de nivel (on/off), retroalimentación y recirculación del caudal de agua y sedimentos del sistema.
- Desarrollar un prototipo sistema de tratamiento de aguas residuales en operación continua, que incluya una etapa de generación de microburbujas.
- Evaluar el mejoramiento de las características del agua residual a través de los procesos a los que es sometido.
- Evaluar la incidencia de la adición de microburbujas frente a la sedimentación ocurrida, en el tratamiento de aguas residuales.

1.Marco teórico

1.1 Aguas residuales

El agua se clasifica como contaminada o residual cuando le son agregadas sustancias ajenas a su composición natural, afectando la calidad de esta y dificultando o empobreciendo su uso [8].

1.1.1 Calidad del agua

Conforme a las definiciones del estudio nacional de aguas, la calidad de esta, es determinada por el análisis del estado y la presión del agua en los cauces, donde el estado es establecido por el Índice de Calidad el Agua (ICA) y algunas variables como, oxígeno disuelto, nitrógeno total, fósforo total y metales pesados; por su parte la presión es la incidencia de los vertimientos de los sectores primarios a las aguas la cual se mide por el Índice de Alteración Potencial de la Calidad del Agua (IACAL), las cuales estudia y mide la composición en demanda biológica y química de oxígeno, sólidos, nutrientes, entre otros [9].

1.1.2 Características del agua residual

Las características del agua residual se denominan como indicadores, los cuales pueden ser divididos en dos tipos, tales como [10]:

Indicadores físico-químicos:

- Olor.
- Materiales en suspensión.
- Color.
- Turbidez.
- Temperatura.
- PH.
- Conductividad eléctrica.

Indicadores biológicos:

En el análisis biológico del agua que siguen dos direcciones o métodos:

- Existen organismos, generalmente bacterias, las cuales son típicas de cada nivel y modelo de contaminación.
- Algunos organismos biológicos cambian sus propiedades físicas en dependencia de la calidad del agua o medio.

1.1.3 Contaminantes sólidos

Se hace referencia a toda la materia ajena al agua que se mezcla o se encuentra suspendida, con excepción de los gases disueltos, se han denominado dos tipos de sólidos [11].

- En suspensión o sedimentables

Se describe como sedimentable a la materia o partículas de tamaño mayor a 1,2 micrómetros, que permanece atrapada flotando o no en las mediaciones del líquido, estos residuos suelen ser materia orgánica, tal como desechos humanos, desperdicios de alimentos, papel, trapos y células biológicas [11].

- Inorgánicos disueltos

Los sólidos inorgánicos disueltos suelen ser en su mayoría partículas de sales tales como calcio, potasio, magnesio, etc. Pero también presenta una poca suma de materia orgánica disuelta, además no pueden ser sedimentables o filtrados, por sus tamaños menores a 1,0 micrómetro [11].

1.1.4 Sólidos totales

En el análisis, los sólidos totales son dados por la materia resultante de la evaporación a aproximadamente 103°C de una cantidad definida de agua contaminada, éste resultante es la suma de sólidos sedimentables y sólidos coloidales (disueltos) [12].

1.1.5 Caracterización de aguas residuales

- **Métodos físico-químicos**

Para la caracterización de las aguas residuales, se hacen tomas de muestras con las cuales se pueden identificar las características físicas de las aguas haciendo un ponderado de estas y estudiando entre otras cosas, las propiedades químicas de sí, obteniendo así datos e información de suma importancia [10]. Entre las cuales los métodos que destacan son el color y la turbidez.

- **Color:** Debido a que muchos desechos generalmente industriales, los cuales, según su descomposición y utilización previa al desecho, suelen pigmentar notoriamente el agua, trayendo consigo problemas en el tratamiento, pues entre otras cosas empobrecen la fotosíntesis y el intercambio de oxígeno.

La caracterización del color suele hacerse mediante dos métodos, método platino-cobalto y comparación por discos coloreados [10].

- **Turbidez:** La turbidez del agua se logra gracias a partículas muy finas que se encuentran en suspensión, ya sean de materiales como la arcilla, materia orgánica, sílice, entre otros.

Es un indicador de importancia en los tratamientos de aguas, ya que es directamente proporcional la riqueza de estas partículas y el nivel de turbidez, niveles que suelen medirse del efecto Tyndall, la opacidad o índice de difusión [10].

- **Métodos biológicos**

Estos métodos representan la observación del nivel de alteración de la vida emergida en esta agua, ya sea animal o vegetal, dado que este tipo de vida tiende a cambiar en propiedades, número de población o en tipo de especies, dependiendo de las características fisicoquímicas del medio donde se desarrolla [10].

1.1.6 Calidad del agua en Colombia

El clima, el espacio y la forma geológica de cada región, son los principales factores que influyen para la depuración del agua y en el estudio de su calidad. Según el informe del estado del medio ambiente del IDEAM para el 2012 los vertimientos de carga orgánica biodegradable alcanzaron las 2,1 toneladas por día, de las cuales la industria vertió el 28% y el 69% para el sector residencial, donde el 80% de la carga total se dio en 55 municipios, principalmente áreas metropolitanas. Por su parte, los sólidos suspendidos totales son vertidos en un 91% debido al sector residencial y un 7% a cargo de las industrias, para una cantidad de 3,1 toneladas por día y 205 toneladas de mercurio por año [13].

1.1.7 Políticas de deposición y tratamientos de aguas en Colombia

- Norma de vertimientos

Resolución 0631 de 2015, norma, actualizada respondiendo a nuevas exigencias, permite tener un control por parte de las autoridades ambientales, en todos los sectores económicos, referente a todos los vertimientos y los contaminantes dispuestos que se generan ya sea en aguas superficiales o alcantarillado, en función de parámetros fijos y establecidos [14].

- Norma de reúso

La ley 373 de 1997 estableció que las labores donde sean generados flujos grandes de aguas deben ser obligatoriamente reusadas y tratadas las aguas de origen superficial, subterráneo y lluvias [15].

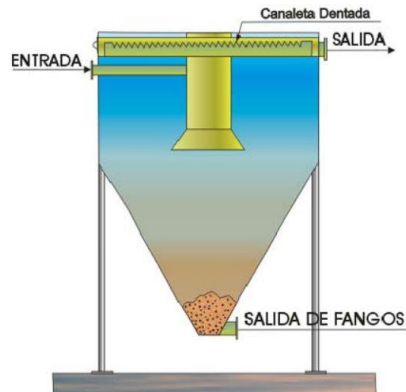
En el decreto 1076 de 2015 se promueve el reúso de las aguas residuales a través de los planes de reconversión a tecnologías limpias en gestión de vertimientos, con procesos graduales para el cumplimiento de la norma de vertimientos [16].

1.1.9 Tratamientos primarios de aguas

En esta fase del tratamiento se intenta retirar al máximo posible, los materiales contaminantes gruesos y/o materia de tamaño perceptible al ojo, además este proceso evita futuros daños en el sistema de tratamiento [3]. Basándose en la extracción de:

- Desechos sólidos, con la extracción de estos se evitan obstrucciones principalmente [3].
 - Arenas y gránulos de material de tamaño similar, sedimentables, para evitar abrasiones y sedimentos en los conductos del agua, de los demás procesos [3].
 - Grasas y elementos espumosos que pueden dificultar el intercambio de aire para la oxigenación, en especial para procesos aerobios [3].
- Clases de tratamientos primarios
 - **Sedimentación:** Gracias a la diferencia de densidades entre el agua y el resto de los elementos contaminantes, las partes más densas tienden a descender al fondo de los envases por acción de gravedad, pasado un tiempo establecido y las menos densas se situarán arriba del agua tal y como se observa en la figura 1 [17].

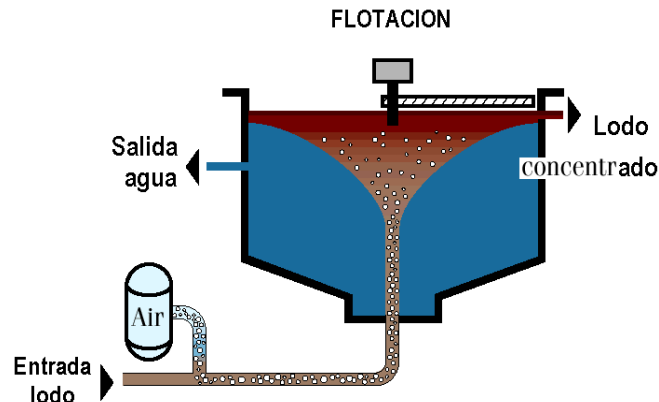
Figura 1: Proceso de sedimentación



Fuente: TSS internacional, Damián Carmona 389 Col. Urdiales, Monterrey. Recuperado de <http://tssinternacional.com/tratamiento-primario/>

- **Flotación:** Se basa en la extracción de grasas, espumas, aceites y otras materias volátiles, o de densidad más baja con respecto a la del agua, las cuales suelen ser ayudadas a estar en la superficie con una inyección de burbujas como se observa en la figura 2, favoreciendo la extracción del lodo concentrado [18].

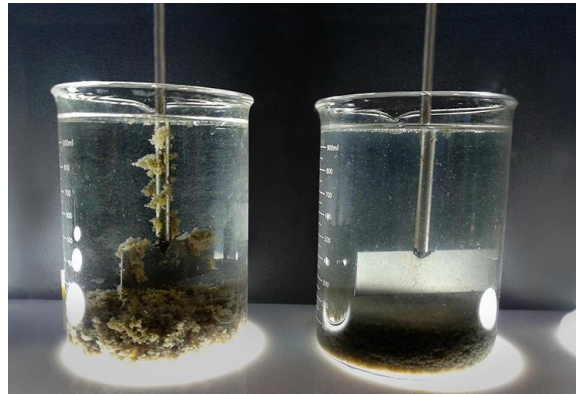
Figura 2: Flotación por aire disuelto



Fuente: Poveda, D. Castellanos, K. 2017. Operaciones con sólidos "Sedimentación" espesadores y clarificadores, U de America <https://www.slideshare.net/ivanramma/espesadores-y-clarificadores>.

- **Floculación:**
Por las propiedades del material en suspensión, generalmente se utilizan coagulantes, que aceleran químicamente la unión de estas partes dispersas y por ende su descenso, como se muestra en la figura 3, donde es importante las medidas correctas, ya que las malas prácticas de la floculación, suele acarrear altos costos, además de empobrecer aún más la calidad del agua, sin embargo, suele ser la más utilizada al ser bastante eficiente para gran variedad de materiales [19].

Figura 3: Floculación



Fuente: Muñoz, C. InduAmbiente N° 161 (noviembre-diciembre 2019), págs. 80-82. Recuperado de <https://www.induambiente.com/floculacion-vital>

- **Cribado:** Después de un proceso previo de extracción de las partes más grandes y pesadas, se procede con el cribado donde se atrapan, en diferentes etapas, los sólidos hasta de 1 cm de tamaño, ya sea gracias a tamiz o con rejilla como se observa en la figura 4 en la que se utilizan rejillas para retener sólidos grandes, luego de esto, conducir el material cribado a un pozo para proceso de sedimentación [20].

Figura 4: Cribado



Fuente: Rejillas para cribado, master builders solutions, Plantas de tratamiento de aguas residuales. Mayo/2017

1.2 Sedimentadores

La sedimentación es un hecho físico en el que el agua se clarifica, este proceso está vinculado a la manera en que descienden las partículas suspendidas en el agua. Cuando se produce sedimentación, el resultado de los procesos siempre se produce una parte clarificada y una parte más densa, el resultado final radica en el interés de quien realiza el proceso dependiendo de qué material de la separación es la que requiere o de sus propiedades [21]. De aquí se puede separar la sedimentación, como proceso, en dos tipos [21]:

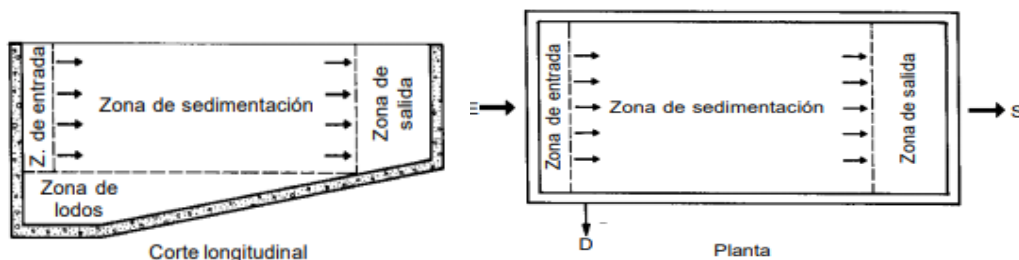
- La sedimentación simple denomina aquellas partículas o material que en el proceso de sedimentación no es diferente en sus dimensiones o consistencia.
- La sedimentación inducida sucede cuando las partículas o material que se sedimentan se unen durante su proceso de caída en el fluido, generando formaciones de material sedimentado más grande al aglomerarse.

1.2.1 Tipos de sedimentadores

- Los desarenadores

La finalidad es retirar la arena mezclada con el agua en cualquier proceso industrial, o de material con dimensiones superiores a 0,2 mm; esto, básicamente para proteger los procesos que tratan el agua más adelante, como lo son bombas y canales en donde la arena y los demás minerales podrían generar abrasión y daño prematuro. Como se muestra en la figura 5, consta generalmente de 4 zonas donde existe una de entrada del agua la cual se almacena luego en la zona de sedimentación, donde los lodos descienden y se acumulan en el fondo llamado zona de lodos, posterior a esto el agua ya sin lodos, es dirigida a la zona de salida del sedimentador [22].

Figura 5: Desarenador



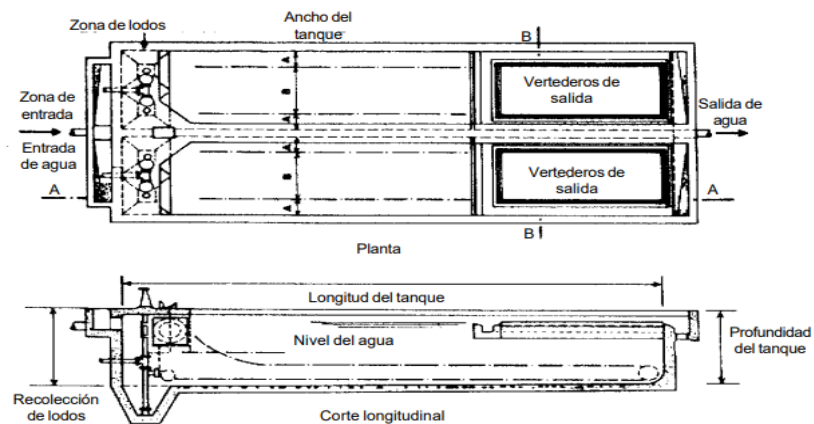
Fuente: Ing Maldonado V. .2017 zonificación de un sedimentador (2004). Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida.

- Sedimentadores de flujo horizontal

Los desarenadores de flujo horizontal tienen una sección que se ensancha para reducir la corriente y así poder realizar la sedimentación, este ensanchamiento baja su caudal a cerca de 40 cm/s en desarenadores estáticos y 2,5 cm/s en desarenadores aireados, esta zona de ensanchamiento se puede observar en la figura 6 en la vista de planta donde se puede ver el ensanchamiento entre la zona de lodos y los vertederos de salida. En cuanto a la eficiencia de estos sedimentadores se basa fundamentalmente en la profundidad del desarenador y la velocidad de paso del agua [8].

El problema de estos desarenadores es que el caudal de donde se recibe el agua puede variar, por lo que la velocidad de circulación del agua cambia y esto hace variar la eficiencia del desarenador [8].

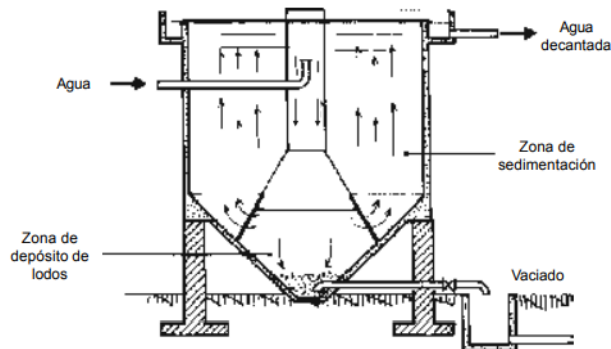
Figura 6: Sedimentador horizontal



Fuente: ING Maldonado, V.2017 zonificación de un sedimentador (2004). Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida.

- Unidades de flujo vertical

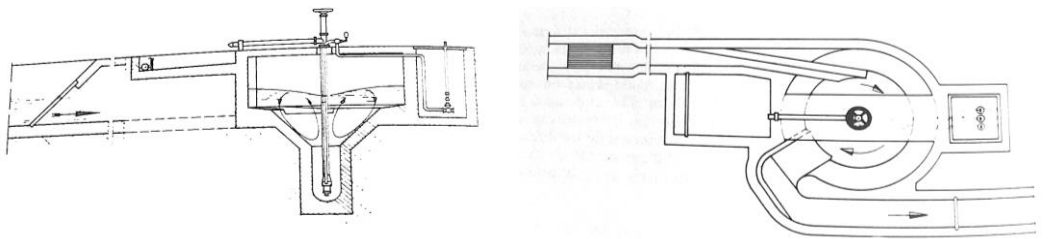
A diferencia de los horizontales los sedimentadores de flujo vertical siempre se encuentran llenos como se evidencia en la figura 7, por lo que no les afecta las variaciones en el caudal que se recibe, ya que su función, es hacer que la velocidad de descenso de los sedimentos sea más rápida que la elevación del agua. La debilidad de estos sedimentadores es su profundidad superior por lo que es un inconveniente en lugares donde no se desee cambiar mucho la altura del agua que se trata [8].

Figura 7: Sedimentador vertical

Fuente: ING Maldonado, V.2017 zonificación de un sedimentador (2004). Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida.

- **Sedimentador de flujo inducido**

En estos encontramos los desarenadores rectangulares aireados en los que el aire que se ingresa genera que el líquido dentro gire, como se puede ver en la figura 8, permitiendo que el líquido se oxigene y mejore la separación de la arena haciendo que en el fondo del sedimentador se cree una velocidad de barrido constante [8].

Figura 8: Sedimentador flujo inducido, izquierda vista lateral, derecha vista superior

Fuente: Depuración y desinfección de aguas residuales, Aurelio Hernandez Muñoz, quinta edición revisada y ampliada, 2001

- **Sedimentador hidrociclón**

Los hidrociclones son ampliamente utilizados para la separación de materiales sólidos de las aguas, gracias a su gran eficiencia y fácil manufactura, además de bajo costo de operación y mantenimiento ya que no tiene partes móviles [22]. Algunas ventajas y desventajas de los hidrociclones (Tabla 1).

Tabla 1: Ventajas y desventajas de los hidrociclones

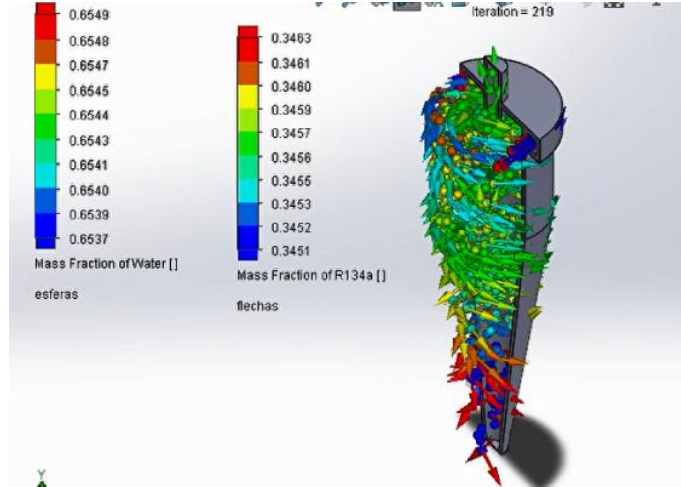
Ventajas	Desventajas
Bajos costos de capital	No se pueden materiales pegajosos aglomerantes.
Ausencia de partes móviles , por lo tanto, Pocos requerimientos de mantenimiento y costos de operación bajos	Las unidades de alta eficiencia pueden tener altas caídas de presión.
Caída de Presión baja	Dependiendo del material del hidrociclón
Requerimiento de espacio pequeño	no maneja partículas abrasivas a altas velocidades de operación.

Fuente: (López Becerra & Trujillo Vera, 2004)

Están formados principalmente por dos secciones, la primera parte es cilíndrico vertical y la siguiente de fondo cónico, los hidrociclones tienen dos salidas y una entrada de la mezcla, donde esta última, es tangencial al cilindro y las salidas se sitúan en el centro del cilindro, la primera salida en la parte superior, y la segunda en la parte inferior en la terminación del cono, llamada ápex, gracias a la fuerza centrífuga, de arrastre y de gravedad, se facilita la separación, donde los sólidos o materiales densos tienden a caer hacia las paredes y al acumularse se dirigen a la salida dos, y la parte acuosa con muchos menos sólidos y menos densa tiende a subir a la salida uno. Los hidrociclones pueden ser configurados en diferentes unidades conectadas ya sea en paralelo, para conseguir mayor volumen de mezcla tratada, aunque si se hace en serie y con diámetros de hidrociclón más pequeños, a los de diseño se mejora notablemente la eficiencia [22].

Una simulación de funcionamiento, como se muestra en la figura 9, indica que a pesar de ser una simulación con fluidos, agua y R134a, el cual es más denso que el agua, se puede evidenciar gracias al diagrama de colores, como la concentración de masa mostrada por las flechas correspondiente a R134a, es mayor en el fondo del cono del hidrociclón, y aunque con una pequeña diferencia con respecto a el fondo, la concentración de masas del agua representada por las esferas es mayor en la parte superior.

Figura 9: Sedimentador hidrociclón

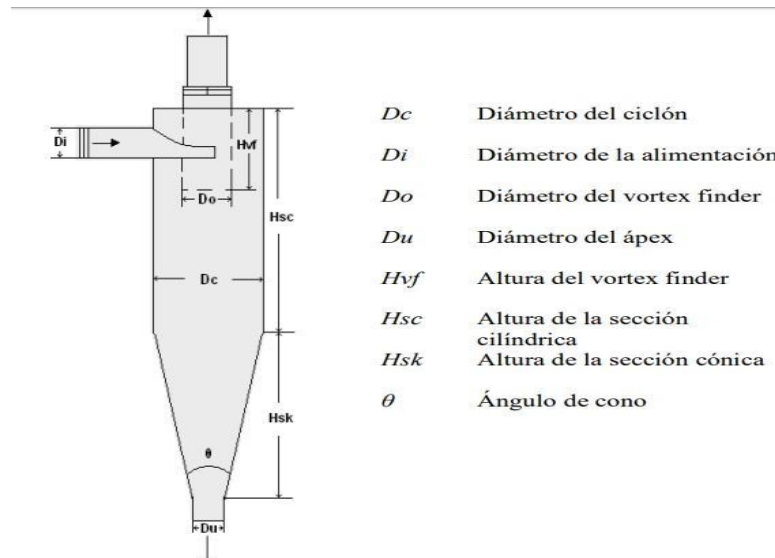


Fuente: Elaboración propia

1.2.2 Fase de diseño del hidrociclón seleccionado

En esta fase se estudiaron los tipos de hidrociclones en el mercado minero, ya que es donde radica mayormente su uso. En la figura 10 se muestran las medidas del hidrociclón utilizadas para su diseño y desarrollo mediante las relaciones de Bradley, con las que se procedió a realizar un modelo en SolidWorks que permite realizar simulaciones del flujo que se ingresó al sedimentador hidrociclón para su posterior implementación mediante impresión 3D [23].

Figura 10: Geometría del hidrociclón



Fuente: ING Chica, Iina. Estudio del cortocircuito de finos en hidrociclones operados con suspensiones poliminerales en la industria cementera, U. Nacional. 2009 [23]

- Fase de prototipado

El hidrociclón se diseñó haciendo uso de las relaciones mostradas en la tabla 2 recomendadas por el autor [24]:

Tabla 2: Relaciones para la construcción de un hidrociclón:

Ciclón	D_i	D_o	H_vf	H_{sc}	L. hidrociclón	Angulo
Bradley	$D_c/7$	$D_c/5$	$D_c/3$	$H_{sc}/2$	$H_{sc}+H_{sk}$	9 grados

Extraído de: Espesamiento de lodos de un sedimentador primario por medio de hidrociclón en una planta de tratamiento de agua residuales domésticas.

En las Operaciones de procesamiento de minerales los tipos de ciclones comúnmente usados son:

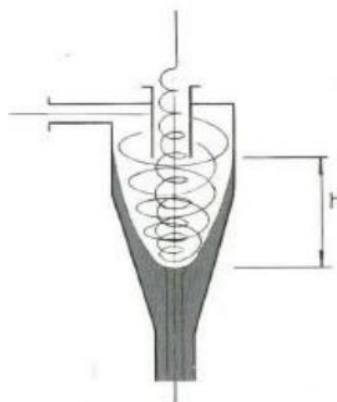
- **Hidrociclones cónicos**

Son los hidrociclones más utilizados, se caracterizan concretamente por estar formado de un cilindro seguido de un cono con ángulo específico [22].

Cono Tendido:

Cono tendido o ancho como el de la figura 11 donde también se muestra el doble vórtice formado por los sedimentos y el agua, son denominados como aquellos que tienen ángulos entre 20° y 45° , generalmente pensados para separación por tamaño o consistencia, con diámetros entre 25 y 125 cm, aunque al tener ángulos tan amplios se reduce la longitud del cono lo que se traduce como tamaño de selección de sólidos más grandes [22].

Figura 11: Sedimentador cono tendido



Fuente: Diseño de hidrociclones <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5214/fichero/Capitulos+PFC%252F2.Bases+te%C3%B3ricas+del+cicl%C3%B3n.pdf>

Cono pronunciado:

Con conos de ángulos menores a 20° como los que se muestran en la figura 12, se suelen tener conos bastantes largos, y generalmente suelen ser precedidos de un cilindro también largo, con diámetros de hasta 25 cm, gracias a las grandes longitudes de estos hidrociclones hacen selección de sólidos mucho más finos, entre los 2 y $30\ \mu\text{m}$ [22].

Figura 12: Diferentes modelos de sedimentadores de cono pronunciado



Fuente: Diseño de hidrociclones <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5214/fichero/Capitulos+PFC%252F2.Bases+te%C3%B3ricas+del+cicl%C3%B3n.pdf>

- **Hidrociclones cilíndricos**

Son hidrociclones que tienen el cilindro seguido de un “cono” de 180° , los cuales suelen ser utilizados en tratamientos especiales, donde el fondo plano, como el de la figura 13, hace que la descarga de sólidos en el fondo, sean de manera tangencial, estos modelos suelen ser poco eficientes [22].

Figura 13: Sedimentador cilíndrico



Fuente: Diseño de hidrociclones <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5214/fichero/Capitulos+PFC%252F2.Bases+te%C3%B3ricas+del+cicl%C3%B3n.pdf>

1.3 Microburbujas

1.3.1 Características de las microburbujas

Las microburbujas están en un rango de diámetro de 1 a 100 μm , debido a su tamaño pueden durar tiempo extenso suspendidas en el agua antes de que emerjan a la superficie o colapsen. Las características más importantes de una microburbuja son su superficie específica alta y una presión interna alta.

Además de las características físicas, las microburbujas generan en el agua una nube blanca que se disuelve y un efecto de efervescencia y espumosis [25].

- Superficie específica

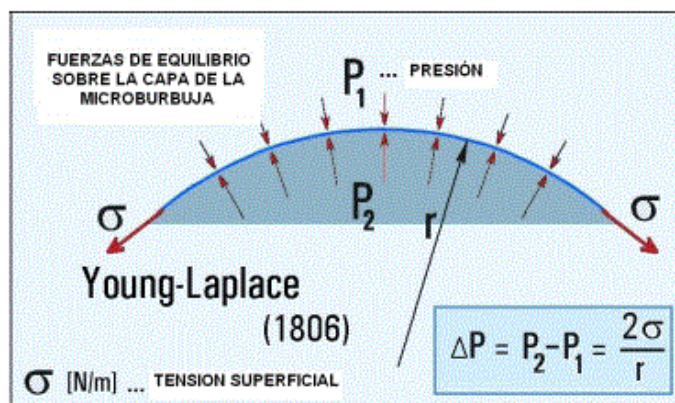
Las microburbujas tienen un área de contacto elevada por unidad de volumen de gas disuelto. Para una cantidad determinada de aire disuelto, se tiene un aumento de superficie específica en contacto. Además, la presencia de contaminantes en el agua ayuda a que las microburbujas se mantengan al formar un recubrimiento, lo que hace la superficie de la microburbuja más compacta [25].

La velocidad ascensional de V_{ab} , es proporcional al cuadrado del diámetro de la burbuja d_b^2 así entonces que una microburbuja de menor diámetro asciende lentamente [25].

- Presión interna alta

Entre más pequeña sea la microburbuja, más grande será la tensión superficial, ya que la presión que actúa sobre las burbujas intenta colapsarlas, la presión interna de las burbujas tiene que ser igual a la que actúa sobre ellas, tal como se puede ver en la figura 14 [25].

Figura 14: Presiones de burbujas



Fuente: Tensión superficial ley de young Laplace Beltrán, C. Eulate, N. 2012, Aplicación de microburbujas en la flotación de lodos de tratamiento de aguas Recuperado de http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2078-55932012000200003&lng=es&nrm=iso

En el equilibrio, la magnitud de la diferencia de presión ΔP , puede ser expresada de acuerdo con la ecuación (1) de Young-Laplace [25].

$$\text{Ecuación 1: } \Delta P = P_2 - P_1 = \frac{4\sigma}{d_b}$$

Cuanto más pequeña la microburbuja, mayor será la presión interna.

$$\text{Ecuación 2: } \square = 2 * (\square) * \frac{1}{P_2 - P_1}$$

Donde:

σ : Tensión superficial del líquido (N/m).

P_1 : Presión ambiente (Pa).

P_2 : Presión interna.

r: Radio de la microburbuja.

La diferencia entre la presión al interior y exterior de la microburbuja es muy grande. La presión interna es mucho mayor que la externa, debido a la tensión superficial [25].

1.3.2 Aplicaciones de las microburbujas

- Eliminación de impurezas de aguas residuales

Las microburbujas en el agua actúan como flotadores para las partículas y para las gotas de aceite elevándose a la superficie y permitiendo así la eliminación de impurezas [26].

La flotación consta de varias etapas para que el proceso se lleve a cabo:

1) Distribución de microburbujas en el agua, 2) Colisión entre las microburbujas y las partículas suspendidas en el agua, 3) Contacto del sistema partícula/burbuja, 4) Arrastre de otras partículas que se encuentran al subir las microburbujas y 5) Ascenso del aglomerado a la superficie donde debe removerse (Strickland, 1980; Sander, 1994) [26].

- Eliminación de alimentos, cristales y químicos

Para la descomposición de la biomasa desechada en las aguas se realiza mediante bacterias y se utilizan procesos aeróbicos o anaeróbicos [26].

- Remoción de sedimentos y lodos

Las microburbujas, por su tamaño diminuto, se caracterizan por tener cargas eléctricas, capaces de atraer partículas suspendidas, haciéndolas flotar de manera muy eficiente. Esta propiedad ha sido bien aceptada en el tratamiento de lodos [26].

1.4 Software de simulación y procesamiento de datos

1.4.1 Matlab

Matlab utiliza lenguaje de programación de alto nivel, para el análisis técnico de datos, donde en la misma interfaz se puede usar cálculos, graficar y programar, con el tiempo se convirtió en una potente herramienta de cálculo y análisis de datos. Dicha herramienta es utilizada en muchos campos de ciencias, economía, e ingeniería. Matlab suele ser empleado para desarrollo de sistemas de control, procesamiento de imágenes y señales, redes, por mencionar algunos [27]:

- Características principales
 - Cálculos matemáticos.
 - Desarrollo de algoritmos.
 - Modelado y simulación.
 - Análisis de datos.
 - Desarrollo de gráficas [28].

- Image processing toolbox

Es una herramienta que permite el procesamiento, análisis y visualización de imágenes en la que se puede llevar a cabo segmentación, mejora y registro de figuras 3D [29].

Las apps de Image processing toolbox puede segmentar datos de imágenes, comparar técnicas de registro de imágenes y procesar por lotes conjuntos de datos, ajustar el contraste, crear histogramas y manipular regiones de interés, entre otros [29].

1.4.2 Software CAD

SOLIDWORKS e INVENTOR son software de diseño CAD 3D (diseño asistido por computadora) para modelar piezas en 3D y planos en 2D. Sus productos ofrecen la posibilidad de crear, diseñar, simular, fabricar, publicar y gestionar los datos del proceso de diseño [30].

- Herramientas

1. Herramientas de diseño para crear modelos y ensamblajes.
2. Herramientas de diseño para la fabricación mecánica, que automatiza documentos de inspección y genera documentación sin planos 2D.
3. Herramientas de simulación para evaluar el diseño y garantizar que es el mejor posible.
4. Herramientas que utilizan los datos de CAD en 3D para simplificar el modo en que las empresas crean, conservan y utilizan contenidos para la comunicación técnica [30].

- Simulación en SolidWorks

SOLIDWORKS simulation es un conjunto de herramientas de ingeniería en 3D con el que los ingenieros pueden configurar entornos virtuales para probar el comportamiento, rendimiento y calidad del producto durante el proceso de desarrollo. Las posibilidades de acercarse a una simulación real son buenas ya que Solidworks permite cambiar los materiales de una base de datos o incluir un material para diseño [31], por ejemplo:

- FLOW SIMULATION, es un asistente de configuración de análisis que permite realizar análisis de flujo térmico y de fluidos, interno y externo. Este entorno de simulación entre otras configuraciones permite simulación de dos fluidos no miscibles como el líquido y el gas en el mismo volumen [32].

1.5 Sistemas continuos

1.5.1 Sistema de producción continua

Refiriéndose a producción continua se habla de adaptar unas instalaciones y operaciones a flujos de producción o circulación sin interrupciones. En estos sistemas las materias primas como el agua y los residuos que se ingresan a ella se deben introducir constantemente reabasteciendo la producción y manteniendo el sistema en constante movimiento [33].

1.6 Antecedentes del tratamiento de aguas residuales y microburbujas

1.6.1 PTAR-El salitre

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “PTAR”- El Salitre , puesta en marcha desde el año 2000, está ubicada al noroccidente de Bogotá, Colombia, en este lugar confluyen todo el alcantarillado desde la calle 26 hasta la 220, contaminada de materia orgánica jabones, detergentes, entre otros, además de tratar el residuo del propio río, provenientes de pueblos aledaños, ya que este afluente presentó un daño crítico debido a su contaminación, y debido a su importante desembocadura con el río Magdalena, se planteó una segunda fase prevista para entregar en el 2021, con actualización y expansión para poder drenar mejor y mayor volumen de agua por segundo [32].

- Fase I

El tratamiento inicia con la recolección de las aguas residuales y extracción de algunas grasas, arenas y sedimentos de gran tamaño, gracias a desarenadores y rejillas asistidos con aireación de burbujas finas, luego se pasa a los clarificadores de rastrillo los cuales se encargan de la extracción de sedimentos primarios y demás grasas, posteriormente se empieza la sección de tratamiento primario químicamente asistido, el cual utiliza coagulación para extracción de grasas y sedimentos volátiles [34].

1.6.2 PTAR-San Fernando

Esta planta de tratamiento ubicada en Itagüí, Antioquia, construida por la Empresa Pública de Medellín (EPM), la cual empezó a operar en el año 2000, recoge las aguas residuales de las casas, fábricas y comercio de los sectores aledaños. Esta PTAR en promedio tiene un caudal de saneamiento de las aguas de 1,3 m³/s, con el cual se busca combatir la grave contaminación de parte del río Medellín [35].

- Tratamiento preliminar

Gracias a rejillas, se descartan en este inicio los sólidos de tamaño considerable, con tres rejillas de limpieza automática para este primer filtro, luego con bombas se eleva el agua desde las rejas hasta los desarenadores, estos últimos son tres, de tipo vórtice de 6 m de diámetro, donde el agua ingresa tangencialmente, y el material pesado se dirige al fondo donde es bombeado hasta la sección destinada para su lavado [35].

- Tratamiento primario

Esta etapa corresponde a los desarenadores primarios, que consta de tres tanques circulares de 38 m de diámetro y 4,3 m de profundidad, donde los sólidos livianos como grasas, aceites y espumas son retirados manualmente, y los más pesados se acumulan en el fondo y mediante barrido y bomba son retirados [35].

- Tratamiento secundario

Iniciando con la técnica de lodos activos, con 3 tanques, de 8064 m³ cada uno, con aireación de burbujas finas gracias a difusores en el fondo de los tanques, además los tanques cuentan con microorganismos que devoran la materia orgánica y biomasa suspendida en el agua residual [35].

- Tratamiento de lodos

Todos los lodos son llevados a tanques digestores anaerobios donde se eliminan agentes patógenos y contenido orgánico. Por último, se deshidratan los lodos con centrífugas, donde se consiguen densidades de lodos hasta del 35% lo que los hace mucho más manipulables para su disposición en el relleno sanitario [35].

1.6.3 Uso de microburbujas con ozono para tratamiento de aguas residuales

Un antecedente importante en cuanto a la generación de microburbujas es el trabajo de Shuili Yu, donde se describe los métodos más comunes para la generación de microburbujas. El primero es la descompresión donde en un tanque se sobresaeta agua con aire a muy alta presión donde una disminución de presión da como resultado la generación de una gran cantidad de microburbujas, este método utiliza un tanque sellado y una bomba para la generación de alta presión. El segundo método consiste en la utilización de una membrana de vidrio SPG, la cual tiene poros de unos 10 µm, la cual genera una red interconectada por la que se genera la dispersión del gas a muy alta presión en el agua, también se demuestra las características de las microburbujas previamente descritas en la sección 1-3 de este libro, el gas utilizado para la generación de microburbujas fue ozono, el cual con sus propiedades de antiséptico ayuda a la desinfección y la eliminación de organismos [4].

Los resultados de la combinación de microburbujas y ozono mostraron que por la gran transferencia de masa y mayor área de contacto del gas con el agua con colorante (para la investigación de Shuili Yu), demostró que la microburbuja obtuvo un contacto de 1,8 veces mayor que la de las macroburbujas, también se investigó la eficiencia de la ozonización con microburbujas en aguas residuales textiles, donde el 80% del colorante fue eliminado en 140 minutos con las microburbujas en comparación a las 280 minutos con macroburbujas.

También se hicieron pruebas en el tratamiento de aguas residuales de fabricación de fibra acrílica, donde con las microburbujas fueron removidos COD en 42%, NH₃-N en un 21% y UV₂₅₄ en un 42%, comparado con la utilización de macroburbujas que tuvieron un resultado de 17%, 12% y 7% respectivamente. También quedó claro que la saturación de las microburbujas de ozono en el agua es mucho mayor y rápida un 15% en 7 minutos en contraste a las macroburbujas con un 2,3% en el mismo tiempo [4].

2. Desarrollo del proyecto

2.1 Análisis de antecedentes

En los antecedentes se evidencia como en grandes plantas como lo son las PTAR, utilizan prácticamente el mismo orden y secuencia de las secciones para el tratamiento de las aguas residuales, que a grandes rasgos inicia con una separación de sólidos gruesos, sigue con etapa de desarenado, remoción de grasas, espumas y sedimentos finos, donde generalmente se hace extracción de biomasa, sólidos en suspensión y disueltos, y por último la desinfección y eliminación de agentes patógenos.

Para la extracción de arenas, sedimentos finos y demás, existen diferentes tipos de sedimentadores, donde por ejemplo en la PTAR San Fernando se utiliza uno similar al hidrociclón.

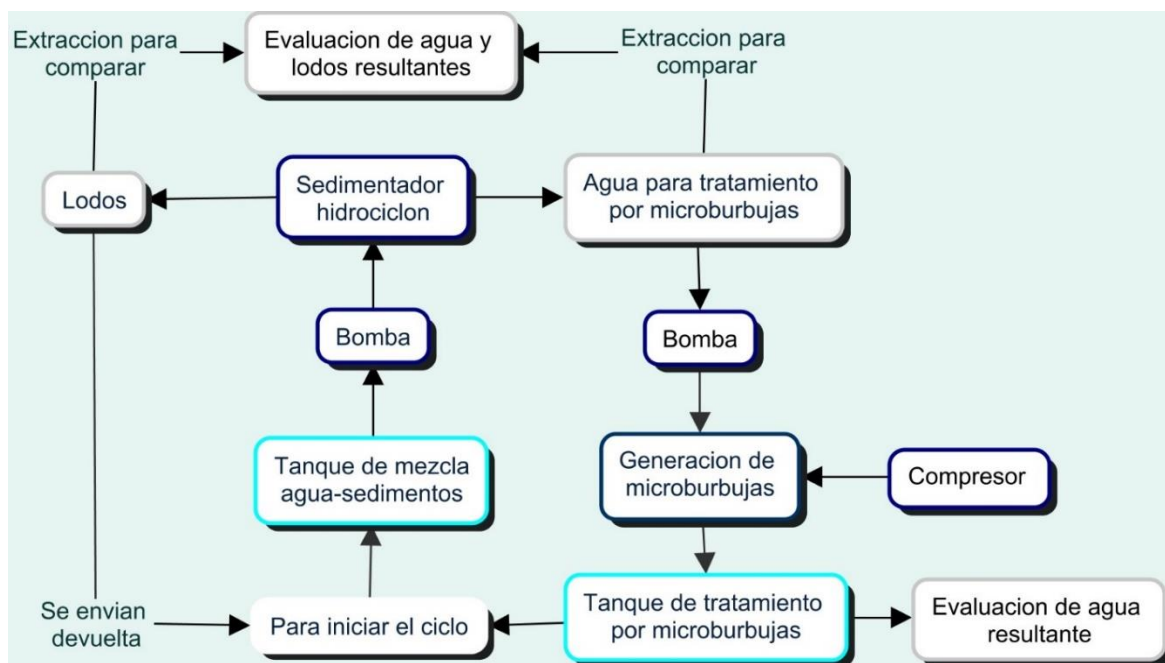
Siguiendo estos ejemplos, en este proyecto omitiremos la parte de extracción de sólidos gruesos, sin embargo, se tomará como inicio el desarenado ya que el tratamiento primario consta básicamente de extracción de sólidos y material en suspensión, y se seguirá con la generación de microburbujas para el análisis de la incidencia de estas en la extracción de los materiales en suspensión y disuelto.

Respecto a las microburbujas el estudio muestra grandes mejoras y ayudas para el tratamiento de aguas, aunque estas al contener ozono podrían variar los resultados, sin embargo, sienta bases con respecto a las medidas de diámetros, además describe dos métodos para la generación, los cuales no se tomarán en cuenta ya que lo que este proyecto propone es un prototipo propio.

2.2 Descripción del proceso para el análisis de las microburbujas

Para el análisis de la incidencia de microburbujas en el tratamiento primario de aguas residuales, basados en los antecedentes, se debe contar con dos fases principales, que serán; la sedimentación y la generación de microburbujas, teniendo en cuenta las cualidades del agua a tratar, y sabiendo que las pruebas son de laboratorio, se determina que debe haber una etapa de captación de agua residual previa a la sedimentación, donde una bomba lleva el agua residual, hasta el sedimentador. Posteriormente en la etapa número tres se capta el agua sin sedimentos gruesos, y en esta misma se generan las microburbujas con ayuda de otra bomba, que toma el agua de esta misma etapa 3 y genera las microburbujas en el mismo recipiente, seguida por la etapa final de captación del agua ya tratada, donde se enfoca el análisis de las propiedades de ésta. Este proceso esta descrito en la figura 15.

Figura 15: Disposición del sistema continuo



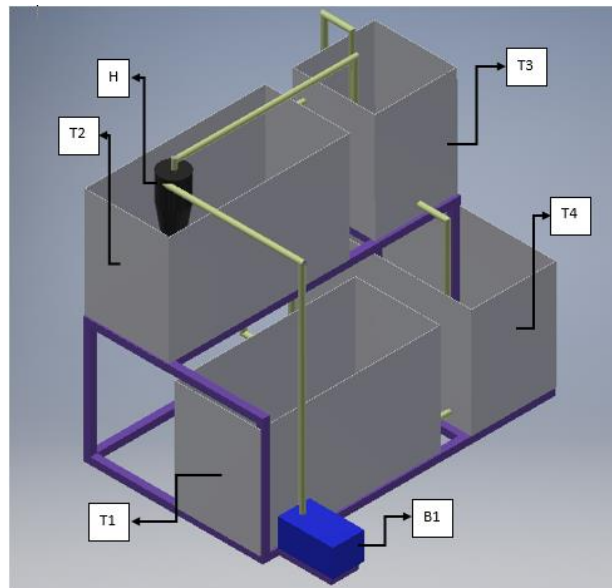
Fuente: Elaboración propia.

2.2.1 Diseño de tratamiento primario

El sistema de tratamiento primario modelado en la figura 16, con planos en el anexo A, empieza impulsando el agua con sedimentos desde el tanque 1 agua-sedimentos (T1) hacia el hidrociclón (H) con ayuda de una bomba (B1), como se muestra en el modelado de la figura 16 donde además se visualizan los siguientes pasos:

- Los lodos resultantes del hidrociclón serán almacenados en el tanque 2 sedimentos (T2) gracias a que se dispondrá el hidrociclón encima para que envíe directamente los lodos y así mismo en el sistema de recirculación mezcle de nuevo el agua resultante con los sedimentos.
- El hidrociclón enviará el agua con baja concentración de sedimentos desde su vortex Finder hacia el tanque de producción de microburbujas (T3).

Figura 16: Modelado de sistema de tratamiento ensamblado



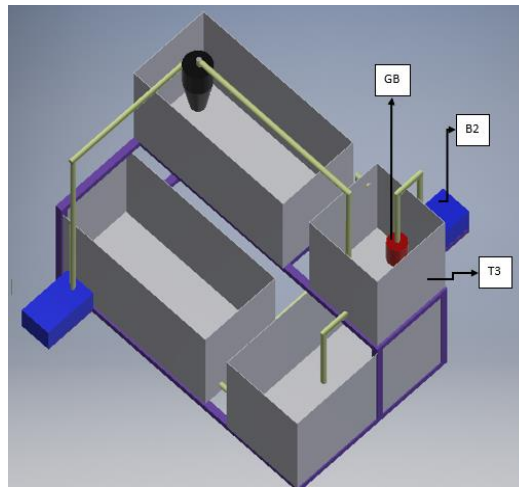
Fuente: Elaboración propia.

Luego de que se tenga el agua sedimentada por el hidrociclón:

- La generación de microburbujas, modelada en la figura 17, se hará con el uso de una segunda bomba (B2) con salida al generador de microburbujas (GB), la cual utiliza la misma agua dispuesta por el hidrociclón en el tanque generador, luego de este tratamiento el agua procesada será dispuesta en el tanque agua-tratada (T4), para su posterior análisis.

- El sistema de recirculación del agua y sedimentos (SR) mostrado en la figura 17, para la simulación de proceso continuo, se realizará mediante gravedad desde los tanques T2, T3 y T4 hacia el tanque T1 con canalización en tubo PVC.

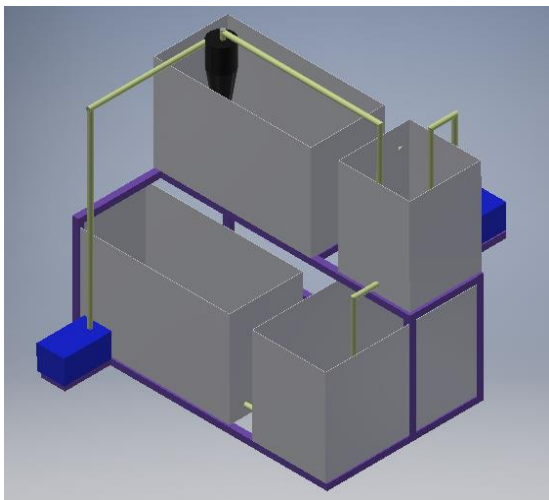
Figura 17: Modelado de proceso de generación de microburbujas



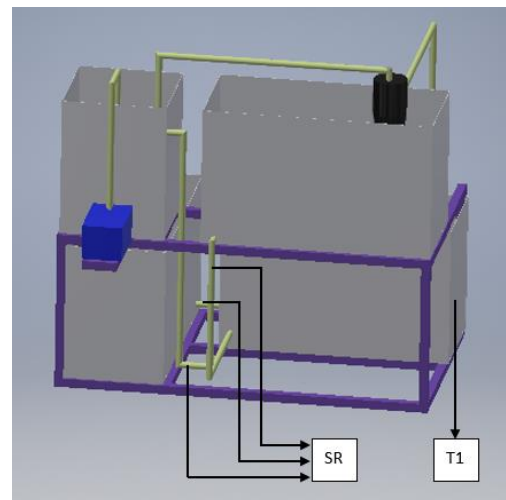
Fuente: Elaboración propia.

Teniendo así un sistema total interconectado y recirculatorio especificado en la figura 18.

Figura 18: Diseño y modelado del sistema, a la izquierda vista ortogonal frontal, a la derecha vista isométrica posterior



Fuente: Elaboración propia.



2.3 Microburbujeador

2.3.1 Diseño de microburbujeador

El microburbujeador se diseñó haciendo uso de un filtro microporoso cerámico para agua de la marca Grival, mostrado en la figura 19, el sistema neumático del laboratorio de la sede sur de la UAN, con control de presión y caudal, será usado para la inyección de aire, de adentro hacia afuera del filtro.

El agua se bombea en la superficie exterior del filtro; con esto se busca que la velocidad con la que el agua circula y su propiedad laminar nos permita generar microburbujas al cortarlas y arráncalas de la superficie del filtro debido al flujo de aire.

Figura 19: Filtro cerámico



Fuente: Elaboración propia.

El microburbujeador se diseñó teniendo como base dos prototipos, para crear dos métodos diferentes de generación y poder comparar. Los dos prototipos por los que se llegó al microburbujeador implementado son los siguientes:

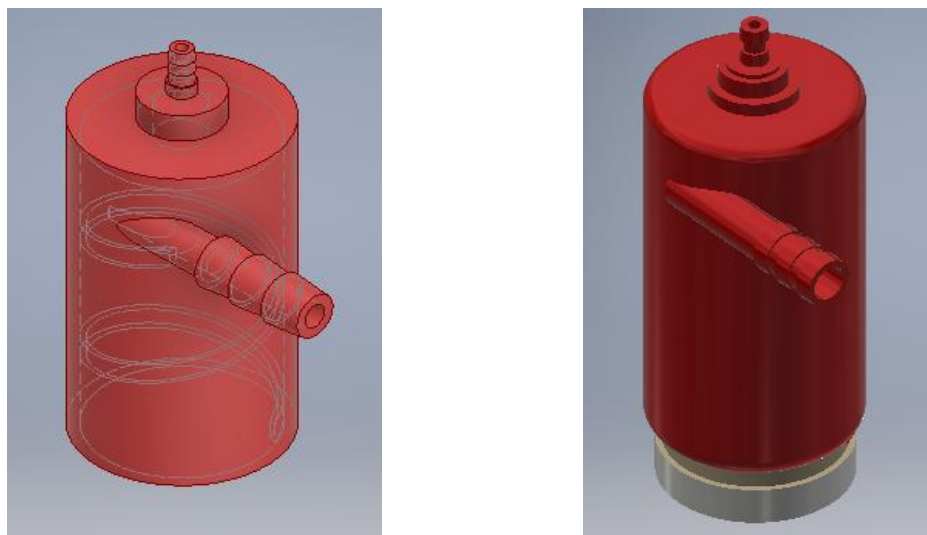
2.3.2 Microburbujeador de flujo de agua helicoidal

Este prototipo se diseñó en el software Inventor, donde para permitir un flujo de agua que recorriera todo el filtro a manera de vórtice y así poder cortar el mayor número de microburbujas posibles.

Este prototipo se empezó diseñando con un tubo de PVC, realizando una entrada tangencial de agua, la cual fue cambiada posteriormente por la misma pieza, pero impresa en 3D mostrada en la figura 20, cuyos planos se muestran en el anexo B.

Para obtener un mejor funcionamiento, la impresión tiene canales guías para el agua y mejor adecuación en las adaptaciones de ingreso de agua y aire, eliminando así fugas y mejorando su eficiencia.

Figura 20: Diseño de pieza de flujo helicoidal, a la izquierda con estilo visual-“aristas ocultas”, a la derecha modelado de ensamblaje con filtro

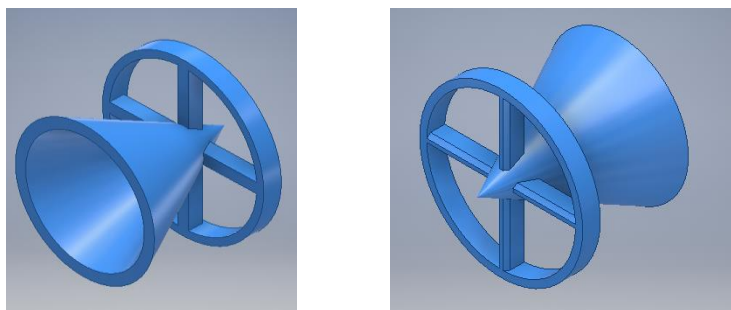


Fuente: Elaboración propia.

2.3.3 Microburbujeador de flujo de agua lineal vertical

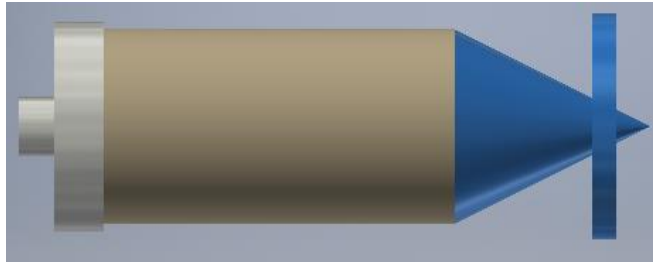
Este prototipo, modelado en inventor y cuyos planos se encuentran adjuntos en el anexo C, hace uso del cono, que enseña la figura 21, de canalización de agua impreso que permitirá llevar el agua de manera laminar a la superficie cilíndrica del filtro sin que se tenga perdida por el choque con la tapa plana del filtro, siendo así montado como se ve en la figura 22, ya que el burbujeador estaría dentro de un tubo por el cual sería canalizada el agua. En las siguientes imágenes se muestra el diseño del cono y el modelado de cómo estaría ensamblado al burbujeador.

Figura 21: Diseño de cono laminar, a la derecha ortogonal posterior, a la izquierda vista ortogonal frontal



Fuente: Elaboración propia.

Figura 22: Diseño y ensamble de microburbujeador de flujo de agua lineal



Fuente: Elaboración propia.

2.3.4 Construcción microburbujeador

- Microburbujeador de flujo de agua helicoidal

Este prototipo fue hecho artesanalmente al inicio, haciendo una adaptación de una manguera como entrada tangencial en un tubo con tapa, como se muestra en la figura 39, sin embargo, se quiso perfeccionar el arrastre helicoidal por lo que fue impreso en 3D, con el ánimo de tener una pieza a medida, donde se evidenciara la eficiencia del agua al pasar de manera helicoidal alrededor del cilindro cerámico luego de aplicar aire que sale por los poros del filtro.

Este prototipo se diseñó para permitir un flujo de agua como una envoltura en forma de remolino, que recorriera todo el filtro y así poder “cortar” el mayor número de microburbujas posibles. Sin embargo, en los primeros prototipos hechos con tubos de PVC lisos se observó que el agua no recorría toda la superficie cilíndrica por lo que se decidió imprimir un cilindro con canales internas para el agua y mejor adecuación en las adaptaciones de ingreso de agua (manguera verde) y aire (manguera azul), con un acople de acero inoxidable, además de un recubrimiento con un pegamento epoxi de dos componentes, eliminando así fugas, como el de la figura 23.

Esto no fue suficiente, ya que, debido a algunas experiencias de laboratorio, al aumentar la presión en la cámara de generación de microburbujas, es decir donde el agua se junta con el aire, aumenta también su eficiencia, entonces se implementa el resto de estructura en PVC como apoyo para aumento de presión interna, dejando como salida de agua y burbujas tan solo dos huecos de $\frac{1}{8}$ de pulgada aproximadamente en el tubo de PVC. El resultado final se muestra en la figura 23.

Figura 23: Prototipo de microburbujeador de flujo helicoidal



Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior se puede observar que se hizo una adecuación de agua mediante manguera de 12,7 mm de diámetro y una adecuación para la entrada de aire mediante manguera de poliuretano de 6 mm de diámetro.

- **Microburbujeador de flujo de agua lineal vertical**

Este prototipo mostrado en la figura 24, se desarrolló debido a que disminuye la pérdida de velocidad al final del filtro ya que el prototipo de flujo helicoidal hace que el agua pierda velocidad al tener que girar antes de salir y debido a la rugosidad del material.

Figura 24: Microburbujeador de flujo de agua lineal



Fuente: Elaboración propia.

Este prototipo, hace uso del cono de canalización de agua impreso en 3D de la figura 21 que nos permite llevar el agua de manera laminar a la superficie cilíndrica del filtro sin que se tenga pérdida por el choque con la tapa plana del filtro.

El prototipo que se muestra en la figura 24 es el que se utilizó finalmente, debido a que el “tubo” hecho de acetato, permite observar el fenómeno de salida de aire del filtro y paso de agua para la formación de burbujas, este acetato fue adherido con pegamento a base de resina llamado “sintesolda”.

2.4 Diseño del hidrociclón

El primer prototipo que se realizó tenía las siguientes medidas las cuales varían en comparación con las relaciones en la tabla 3 debido a la impresión del prototipo:

Dc:140 mm

Tabla 3: Medidas del primer prototipo realizado

Ciclón	Di	Do	Hvf	Hsc	L. hidrociclón	Ángulo de cono
Bradley	20 mm	15 mm	40 mm	75 mm	170 mm	40°

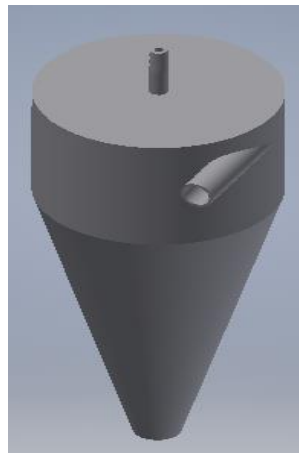
Fuente: Elaboración propia

Du: 27 mm

Hsk:120 mm

con estos datos se muestra el diseño en la figura 25 y planos en el anexo D.

Figura 25: Primer prototipo de sedimentador



Fuente: Elaboración propia.

En este caso, cuando se hicieron las pruebas respectivas se observó que la bomba utilizada no podía suplir la necesidad del sedimentador diseñado en cuanto a caudal, lo que deducía un mal funcionamiento. Lo que sucedía era que no se llenaba por completo para permitir la generación del doble vórtice que separa el fluido desarenado. También se observó que el cono era demasiado corto y esto no permitía la adecuada separación del fluido que sale por la parte superior y el fluido con sedimentos que se extrae por la parte inferior.

El siguiente prototipo con el cual se realizó la simulación de la figura 9, en SolidWorks flow simulation, además para ilustrar mejor en el anexo H se podrán encontrar otras simulaciones hechas con longitudes de cilindro y cono diferentes, y aun siendo simulaciones de líquido-líquido, sirven para tener una guía del funcionamiento respecto a sus dimensiones.

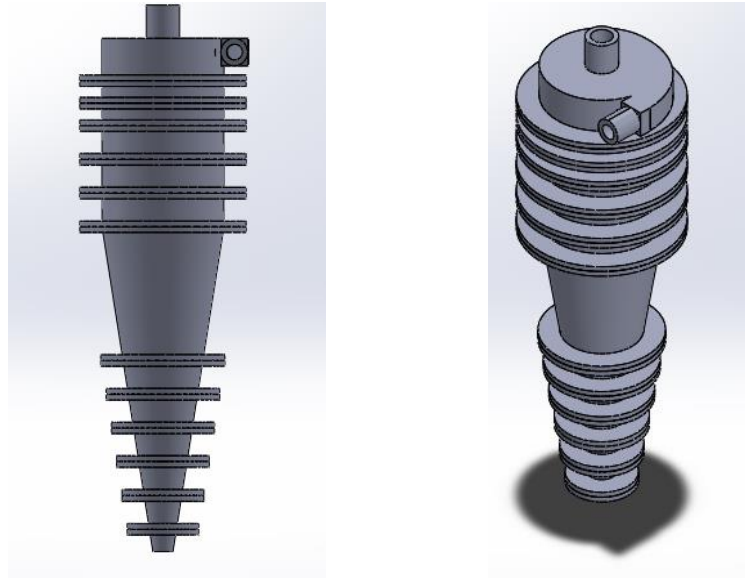
El siguiente modelo, y es el que finalmente se seleccionó, se diseñó de manera seccionada, con el ánimo de realizar distintas pruebas según la longitud del cilindro del hidrociclón y del cono ya que era necesario probar en qué longitud se mejoraba en cuanto a separación de material a sedimentar, como se muestra en la figura 26, con planos en el anexo E, Las secciones mencionadas se sitúan en dos partes del hidrociclón; en el cono donde las extensiones miden 30 mm cada una y en el cilindro bajo la sección de ingreso de mezcla donde las extensiones miden 20 mm cada una.

En este diseño se utilizó un diámetro del cilindro de 100 mm. Con este prototipo se obtuvieron las siguientes medidas base que son tomadas en cuenta sin extensiones. usando las relaciones descritas en la tabla 4:

Tabla 4: Medidas base del hidrociclón, las medidas presentadas están en mm

Ciclón	Di	Do	Hvf	Hsc	L. hidrociclón	Angulo
Bradley	14,5 mm	20 mm	3,3 mm	50 mm	170 mm	24 °

Fuente: Elaboración propia.

Figura 26: Prototipo de sedimentador dos, vista frontal y ortogonal

Fuente: Elaboración propia.

2.4.3 Fase de construcción

El diseño y modelado en SolidWorks del sedimentador seccionado permite hacer diferentes pruebas, ya que su eficiencia se basa prácticamente en las longitudes del cilindro y del cono, al igual que algunas piezas de los prototipos del burbujeador, se imprimió en 3D, con las dimensiones mostradas en la tabla 5, por su facilidad de moldeado y fácil acceso a la impresora que la Universidad Antonio Nariño dispuso, fue ensamblado con 4 tornillos de 6 x 15 mm dispuestos en cruz, por cada unión, donde también se utilizó silicona fría roja de marca Loctite, para sellar y evitar fugas, ya que la impresión 3D no puede rellenar completamente los espacios, dando paso así a pequeños poros de potenciales fugas, no obstante, fue en la pieza “tapa principal” donde fue más notorio y tuvo fugas de agua considerables, así que se utilizó silicona fría transparente a modo de capa para cubrir toda la pieza, al final se decidió adaptar un cilindro de acetato, para la visualización del funcionamiento interno, además de que este también podía ser modificado en su altura como se pensó inicialmente el sedimentador, este acetato fue adherido con pegamento de dos componentes (resina epoxi y endurecedor), por último se adaptaron dos tubos de PVC, para una de las salidas y la entrada. El resultado final del ensamble se muestra en la figura 27.

Tabla 5: Medidas finales sedimentador hidrociclón

Ciclón	Di	Do	Hvf	Hsc	L. hidrociclón	Angulo
Bradley	14,5 mm	20 mm	3,3 mm	135 mm	430 mm	24 °

Fuente: Elaboración propia.

Se sumaron las medidas de una extensión superior, una extensión con acetato y 6 extensiones en el cilindro

Figura 27: Sedimentador hidrociclón en uso



Fuente: Elaboración propia.

2.5. Diseño de control de nivel on/off

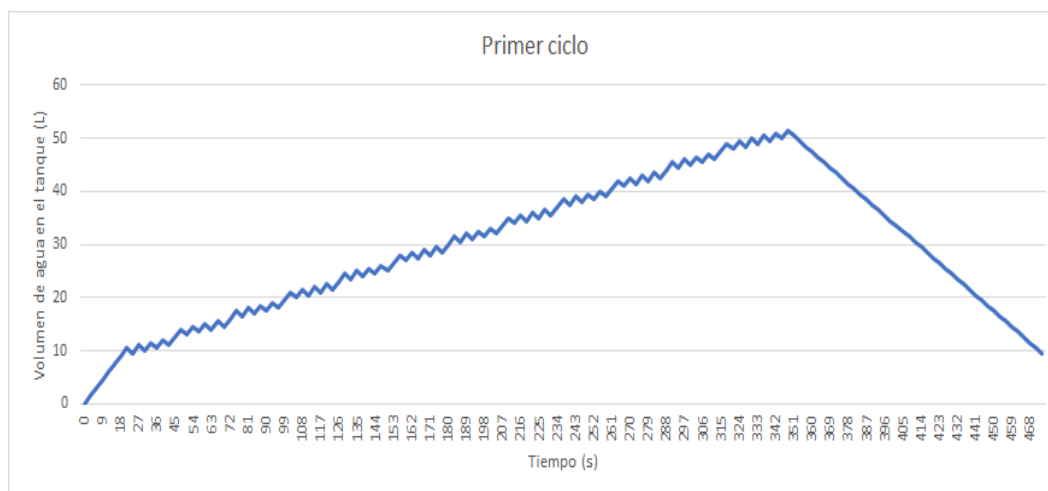
Debido a las necesidades del proyecto, su potencial aplicación y necesidad de desarrollos de bajo costo, se desarrolla un control de nivel para tanque de 61 L, basado en el control de altura de líquido máximo y mínimo para el funcionamiento de cada bomba y el compresor de aire, además del retorno de las sustancias contaminantes o sólidos. Ya que la bomba necesita una altura mínima para su correcto funcionamiento, evitar averías y sobrecalentamientos, además de impedir que el agua se rebose por los tanques.

2.5.2 Simulación de funcionamiento del control de nivel

Para la simulación de este sistema de control de nivel, se realizó una programación en Matlab, donde las variables de sensores, relés, bomba y válvula tienen el mismo nombre del diagrama eléctrico, la programación que puede ser encontrada en el anexo F. La cual simula un volumen de llenado y su control al incrementar y decrecer el valor de una variable (Vol1) en litros, dentro de un rango, los cuales simulan los límites mínimos (10 L) y máximo (51 L) correspondientes a los sensores.

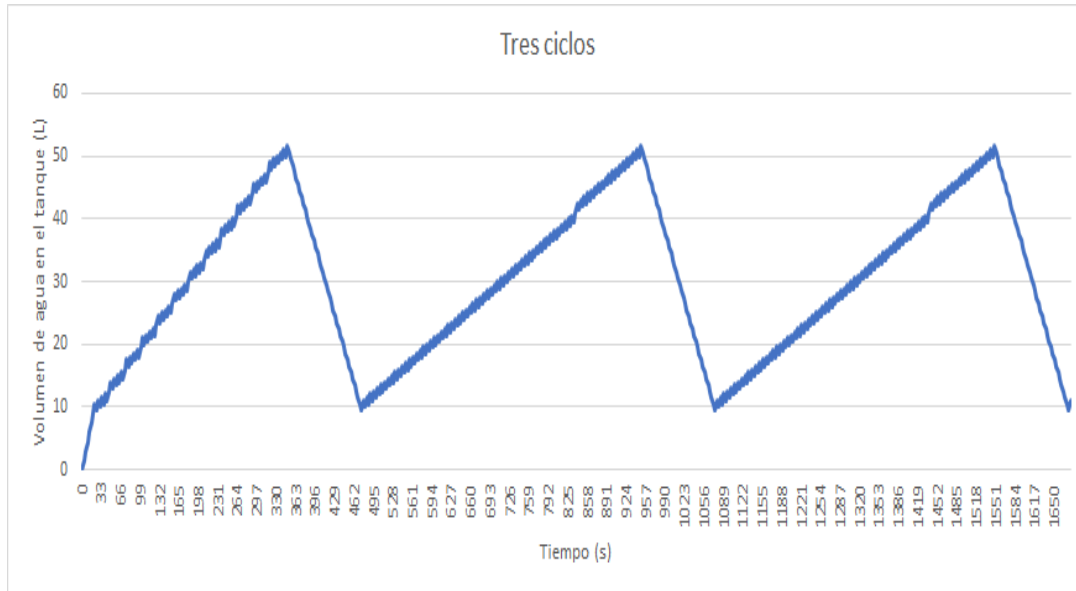
Al consolidar estos datos, como se muestra en la gráfica 1 un primer ciclo, teniendo en el eje y el volumen en litros y en el eje x el tiempo en segundos, iniciando en los primeros 18 segundos se da la apertura de la válvula y con esta el llenado hasta el límite mínimo, a partir del segundo 19 al 348 (alrededor de 5,5 minutos) se da la activación de la bomba, debido a que la válvula llena a razón de 1,2 veces se llena más rápido de lo que desocupa, así que al segundo 348 llegará al límite máximo de volumen lo que desactiva la válvula, y entre los segundos 348 y 468 unos 2 minutos, se vacía el tanque gracias a la bomba, hasta el valor mínimo de volumen y así terminaría el primer ciclo.

Gráfica 1: Representación gráfica del primer ciclo de trabajo del sistema de control



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 2, se representan 3 ciclos, aunque el sistema será utilizado la cantidad de ciclos de funcionamiento requerido. Se muestra, al igual que la primera gráfica, el volumen vs tiempo, y el cómo transcurre el proceso de control de nivel en los ciclos posteriores al primer ciclo, el cual funciona exactamente igual al primer nivel ignorando el llenado inicial hasta el límite mínimo, y además de tener los mismos tiempos de duración y misma secuencia.

Gráfica 2: Representación gráfica del primer ciclo de trabajo del sistema de control

Fuente: Elaboración propia.

2.6 Construcción sistema de tratamiento continuo

2.6.1 Desarrollo del sistema continuo

El ensamble se hizo en dos fases, y debido a un problema de adquisición de elementos, tuvo que ser modificado e montaje final, aunque cabe resaltar que sigue siendo un sistema continuo; la primera fase siendo la captación y proceso de sedimentación, iniciando con el tanque de almacenamiento de agua con lodos (T1), mostrada en la figura 29, con adaptaciones para la entrada de una bomba de agua (B) convencional de $\frac{1}{2}$ HP y 43 L por minuto; la salida de la bomba dirigida a la entrada del hidrociclón (H), donde su salida secundaria “con lodos”, resultaría en el mismo tanque T1, y la salida principal del Hidrociclón de “aguas sin sólidos”, es canalizada a un segundo tanque (T2) “caja organizadora” mostrada en la figura 30, donde puede tomar muestra de la salida del sedimentador y finaliza esta fase, la cual puede ser visualizada en la figura 31 y todas las conexiones y canalizaciones son en tubo PVC de $\frac{3}{4}$ pulgada.

Figura 29: Tanque almacenamiento de agua con sedimentos



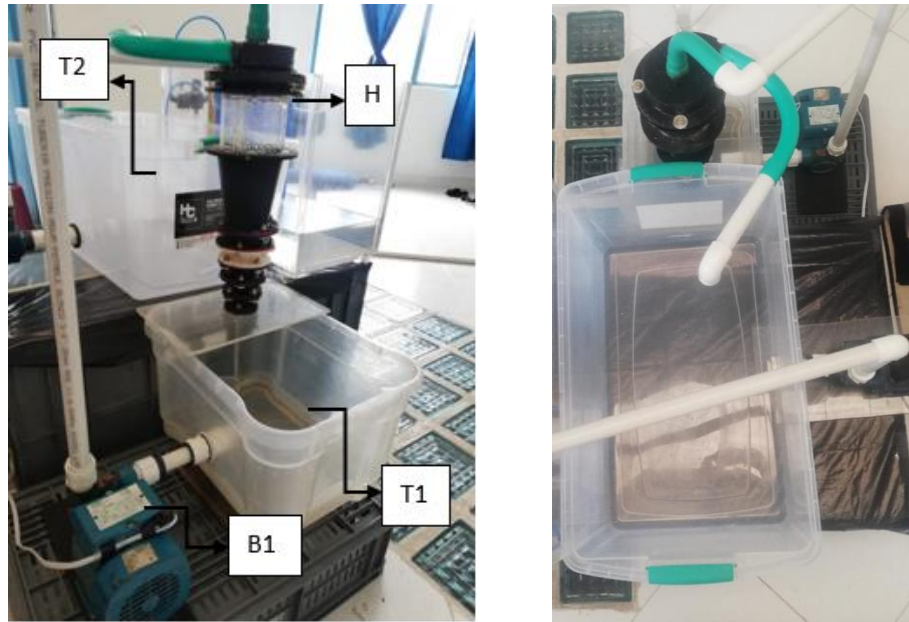
Fuente: Elaboración propia.

Figura 30: Tanque T2



Fuente: Elaboración propia.

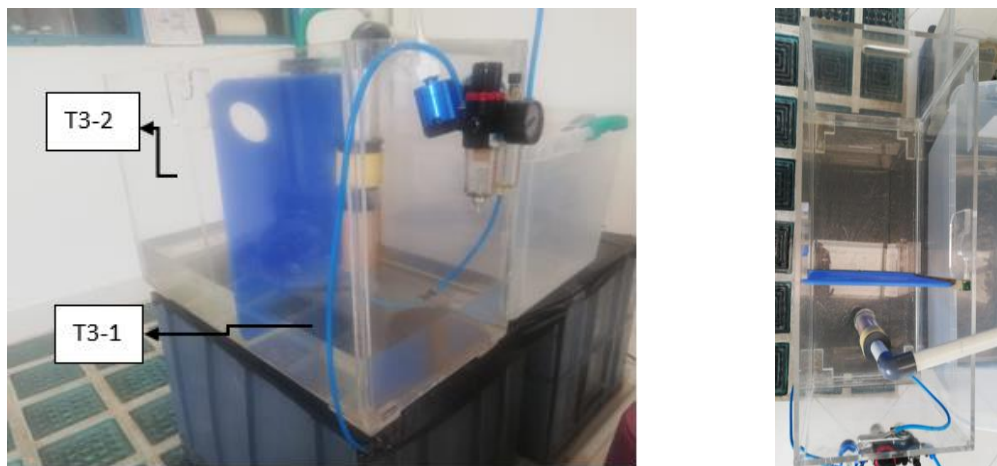
Figura 31: Montaje de la primera fase, vista ortogonal, vista superior



Fuente: Elaboración propia.

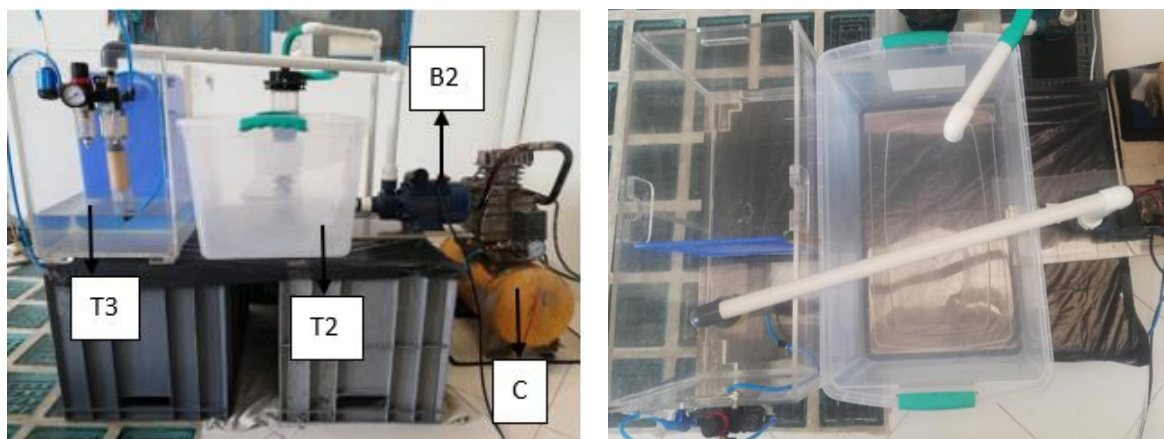
Para la segunda fase, continua con el tanque T2, el cual está conectado a un tanque de acrílico (T3) como el de la figura 34, este último está dividido en dos partes, la primera (T3-1) donde se hace la generación de microburbujas, con una bomba (B2) que utiliza el agua de este mismo tanque y un compresor que inyecta el aire conectados a uno de los prototipos generadores de microburbujas, y la segunda parte (T3-2) donde se almacena el agua tratada con los dos procesos, la segunda fase puede observarse en la figura 31 y el sistema completo en la figura 32.

Figura 32: Tanque T3 de acrílico. vista ortogonal, vista superior



Fuente: Elaboración propia.

Figura 33: Montaje de segunda fase, vista lateral, vista superior



Fuente: Elaboración propia.

Figura 34: Sistema de tratamiento primario completo, vista ortogonal y vista superior



Fuente: Elaboración propia.

3.Evaluación de resultados

3.1 Resultado del proceso de desarenado por hidrociclón

Los sedimentos ingresados al sistema varían a través del transcurso de las pruebas que se realizaron, se decidió hacer pruebas con arena, café tostado y lodo común, además que esta evaluación se hace únicamente con comparativa visual, ya que no se logró tener acceso a laboratorios ni equipos de medición.

Las pruebas realizadas se hicieron de manera controlada para permitir diferenciar los beneficios de la aplicación entre un material y otro, se sabe que el caudal de tratamiento en la salida de agua sin lodos del hidrociclón es, aproximadamente, de 23 L por minuto con el funcionamiento de la bomba de 43 L por minuto.

3.1.1 Resultados visuales con sedimento de arena

La primera prueba se realizó con arena común de construcción, para las pruebas en el sedimentador se tomaron dos muestras de agua en dos recipientes, cada una en cada salida del hidrociclón, las muestras que fueron tomadas al mismo tiempo, muestran su resultado en la figura 35, donde da cuenta de la salida del ápex (salida con sólidos) en el recipiente a la derecha y en recipiente a la izquierda la salida de agua "limpia", es considerable la apreciación de la separación de sólidos, y aunque, no es total, si se nota una mejoría visualmente.

Figura 35: Muestras de salidas del hidrociclón, a la izquierda mezcla de agua y sedimentos para reinicio del proceso y a la derecha resultado desarenado de un paso por el hidrociclón



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la anterior gráfica, en el recipiente de la izquierda (salida del sedimentador), en efecto, gracias a el cambio de coloración es notoria una concentración menor de sedimentos, en contraste con el agua de la salida ápex (Salida de sedimentos), correspondiente al recipiente de la derecha, pero, se diría que esto no es concluyente, debido a que esta arena húmeda de por sí, es bastante pesada, lo que facilita su disposición en el fondo, entonces no es posible saber si el resultado de esta prueba es gracias al trabajo del hidrociclón o por la propiedad de la arena húmeda antes mencionada.

3.1.2 Resultados visuales con sedimento de café tostado

En la segunda prueba se seleccionó café molido tostado, ya que gran parte de este, flota, en esta prueba al igual que la anterior, se tomó la muestra en dos recipientes al mismo tiempo en las dos salidas de hidrociclón, haciendo una comparación visual de las dos muestras, se evidenció notablemente que la separación de sedimentos gracias al hidrociclón es adecuada, a pesar de que los sólidos flotan. Como se muestra en la figura 36, la salida del ápex, recipiente a la derecha, tiene más granos del sólido en suspensión flotando que la salida dos, mostrada en el recipiente a la izquierda, la cual el agua tiene muy pocos sólidos, o con sólidos aparentemente de tamaño menor ya que están disueltos, dando esa coloración marrón, este fenómeno sucede gracias al tamaño de corte, o de separación, por las propiedades de trabajo del hidrociclón.

Figura 36: Diferencia en los sedimentos de café con un paso por el hidrociclón, al lado izquierdo salida de mezcla para reinicio de proceso y al lado derecho salida de agua tratada con un paso por hidrociclón



Fuente: Elaboración propia.

3.1.3 Resultados visuales con sedimento de Lodo

Finalmente se realizaron pruebas con lodo común (tierra), ya que se quería simular, en medida de lo posible, la situación más parecida a los sedimentos manejados en un tratamiento primario de aguas residuales habitual. Al igual que las pruebas anteriores, se tomaron dos muestras cada una correspondiente a una de las salidas del hidrociclón, el producto de la salida del ápex del hidrociclón a la derecha y la salida del agua sin lodos a la izquierda mostrada en la figura 37, donde sobresale la alta concentración de sólidos suspendidos y en el fondo del recipiente de la izquierda, en comparación con el resultado de la muestra a la derecha donde es apenas notable la pigmentación por sólidos disueltos.

Figura 37: Muestra de cambio en resultados luego de un paso por el hidrociclón (lodo), lado izquierdo mezcla para reinicio de proceso, lado derecho resultado después de un paso por el hidrociclón



Fuente: Elaboración propia.

Tras el transcurso de un par de minutos, los sedimentos más pesados de las muestras tomadas descienden al fondo del recipiente, como se muestra en la figura 38, la cual muestra una vez más que estos sólidos se conservan en gran parte a la salida del ápex.

Figura 38: Muestra de resultados provenientes del hidrociclón permitiendo asentamiento de sedimentos



Fuente: Elaboración propia.

3.2 Generación y medición de microburbujas

3.2.1 Generación de microburbujas artesanal

Inicialmente para evidenciar la generación de microburbujas, se hicieron varias pruebas piloto, con el generador helicoidal artesanal que se muestra en la figura 39, el cual tuvo grandes indicios de microburbujas con características de tal generación ya que era visible una nubosidad blanquecina y algo de efervescencia. De estas pruebas realizadas se pudo obtener imágenes como la de la figura 44.

Figura 39: Prototipo artesanal de microburbujeador de flujo helicoidal



Fuente: Elaboración propia.

- Medición de las microburbujas

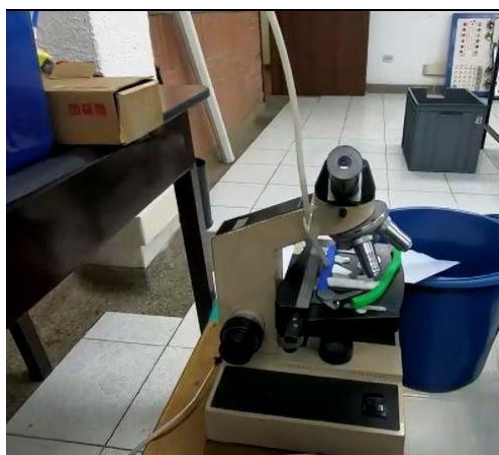
Así que se pensó que para la visualización además de pigmentar con colorante para comida azul, para luego realizar un montaje para extraer las burbujas de manera aleatoria haciendo uso de una manguera sumergiendo una punta en el tanque generador de microburbujas, y en la otra punta se genera vacío gracias a una jeringa la cual succiona el agua por la manguera y al dejar este extremo de la manguera a un nivel un poco más bajo, y quitando la jeringa, la diferencia de niveles hará que gracias a la tensión interna del agua, ésta tenga flujo constante por la manguera hasta que la punta sumergida no tenga contacto con el agua, es natural que solo se dejó irrigar suficiente agua sobre una “piscina” hecha en el portaobjetos del microscopio, para tomar la evidencia haciendo uso de un microscopio y luego dirigir el agua a un balde. Haciendo que el generador de microburbujas funcionara para inmediatamente conducir el agua, como se puede observar en la figura 40 y figura 41, lo cual permite llevar una muestra inmediata y así se puedan medir las burbujas al momento de generarlas.

Figura 40: Pigmentación para medición con microscopio



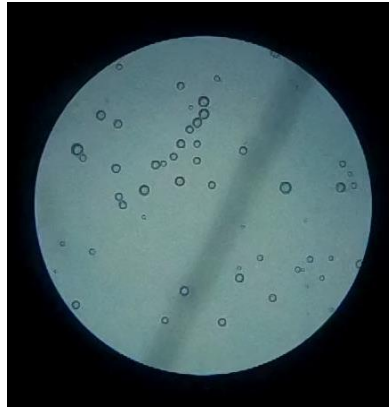
Fuente: Elaboración propia.

Figura 41: Montaje para medición con microscopio



Fuente: Elaboración propia.

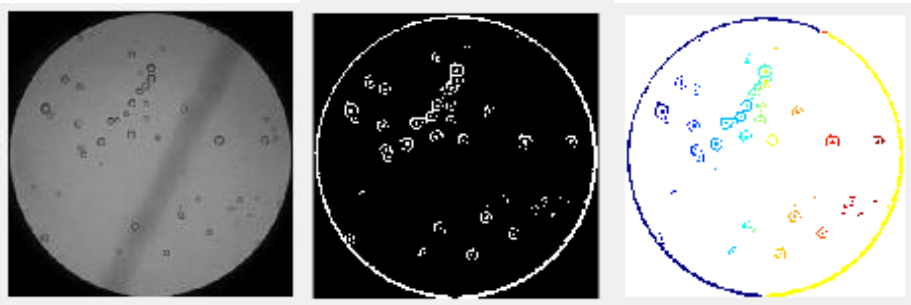
La evidencia en el microscopio se da como se demuestra en la figura 42 captura dada en el lente del microscopio y nos permite evidenciar la existencia de microburbujas presentes en el agua pasante por el portaobjetos del microscopio en cual tiene un hilo de cobre como referencia para la medición en proporción ya que el diámetro del hilo de cobre mide $110\ \mu\text{m}$ de diámetro aproximadamente.

Figura 42: Captura de visualización con microscopio

Fuente: Elaboración propia.

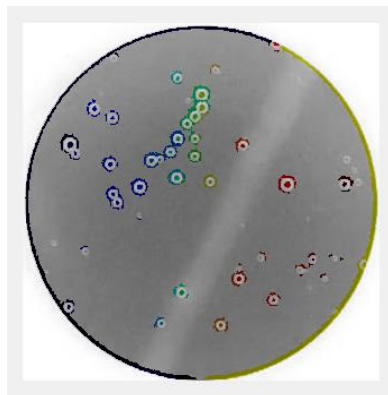
Se utiliza Matlab para correr un código el cual fue tomado de la página oficial de Matlab y haciendo uso de librerías, fue configurado para nuestro caso particular, este código analiza una imagen determinada, para reconocer e identificar una burbuja y mostrar una medida en pixeles, lo cual puede ser extrapolado y tomando como referencia el hilo para hallar un diámetro concreto o muy aproximado de la burbuja.

El código de Matlab del anexo G, hace un tratamiento de imagen, donde se transforma a escala de grises la imagen, luego binaria para posteriormente poder identificar centros y círculos para la identificación de burbujas, este proceso es mostrado en la secuencia de la figura 43 y mostrando el análisis visual final en la figura 44.

Figura 43: Secuencia de tratamiento de imagen

Fuente: Elaboración propia.

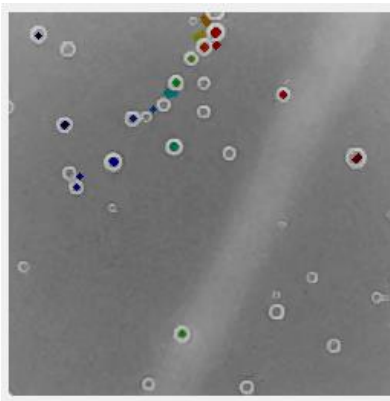
Figura 44: Resultado de tratamiento de imagen



Fuente: Elaboración propia.

Este programa desarrolla una tabla con área, centroide y diámetros equivalentes en píxeles como se muestra en la tabla 3-1, y si se sabe que en la imagen mostrada en la figura 44 el hilo del cobre mide $110\ \mu\text{m}$ de diámetro y con ayuda de la herramienta “brush” del visualizador de imágenes del Matlab se sabe que el hilo de cobre mide unos 42 píxeles de diámetro aproximadamente, podemos por regla de 3 simple, saber a cuánto equivalen los diámetros, sin embargo, debido a la baja calidad de esta imagen, el programa no logra identificar única y exclusivamente la burbuja, a pesar de esto y haciendo un recorte de la imagen de este procesamiento, mostrada en la figura 45, aunque tiene algunos datos de “ruido”, la mayoría corresponden a burbujas y se obtuvieron los siguientes datos de la tabla 6:

Figura 45: Imagen recortada y procesada en matlab



Fuente Elaboración propia.

Tabla 6: Datos del análisis de imagen

Área (pixeles^2)	Centroide (pixeles)	Diametro (pixeles)
13	20	4,0
21	37	5,1
13	45	4,0
13	47	4,0
27	69	5,8
13	82	4,0
41	106	7,2

Fuente: Elaboración propia.

En el recorte de la imagen y haciendo uso de las herramientas del visualizador de imágenes se puede saber que las burbujas miden en promedio 5 pixeles de diámetro, como se muestra en el diámetro aproximado de la tabla, y si los valores coinciden de esta manera se puede hacer regla de 3 para hacer la equivalencia de pixeles en micrómetros, como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7: Equivalencia de diámetros en micrómetros de las burbujas con diámetro de cable en píxel = 42 y diámetro de hilo de cobre = 110 μm

Área burbuja (píxel)	Diámetro burbuja (píxel)	Diámetro burbuja (μm)
13	4,0	10,5
21	5,1	13,3
13	4,0	10,5
13	4,0	10,5
27	5,8	15,2
13	4,0	10,5
41	7,2	19,0

Fuente: Elaboración propia.

Lo que corrobora que, si existen microburbujas en esta muestra del prototipo artesanal, ya que en promedio las burbujas tienen una dimensión de 11 μm de diámetro.

Para una microburbuja de 11 μm de diámetro se tiene una presión interna de:

Presión bajo el agua a 12 cm de la superficie:

Presión atmosférica promedio Bogotá: 75.23 kPa [36]

$$P_{ext} = \rho_{agua} * h * g + P_{atm}$$

$$P_{ext} = 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * (0.12\text{m}) * 9.98 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$P_{ext} = 1,194 \text{ kPa} + 75.23 \text{ kPa} = 76,424 \text{ kPa}$$

$$P_{int} = P_{ext} + 2 * 72.2 * 10^{-3} \frac{\text{N}}{\text{m}} * \frac{1}{5.5 * 10^{-6} \text{m}}$$

$$P_{int} = 102.68 \text{ kPa}$$

3.2.2 Generación de microburbujas con prototipos

Cabe señalar que al no poder tener acceso a los laboratorios ni dispositivos de la universidad, no fue posible obtener fotografías del microscopio, de las burbujas generadas por estos nuevos modelos prototipos de generadores, por ende no fue posible obtener un dimensionamiento de estas ni su densidad, sin embargo, gracias a que en el agua limpia tiene ciertas características visuales, como se explicaron anteriormente, como una especie de nubosidad, blanqueamiento del agua y efervescencia, se puede suponer con una alta probabilidad de que existen microburbujas como se expresa a continuación.

- Generación de microburbujas helicoidal

En la generación de microburbujas con el microburbujeador helicoidal se pueden apreciar, como se muestra en la figura 46, burbujas de gran tamaño sin embargo también se puede ver cómo se forma una nube de burbujas alrededor de la salida del burbujeador dando un toque blanquecino en esta nube, lo que representa una presencia de microburbujas.

Figura 46: Ejecución del burbujeador helicoidal. Espumosisidad al lado izquierdo, nube blanquecina imagen del lado derecho



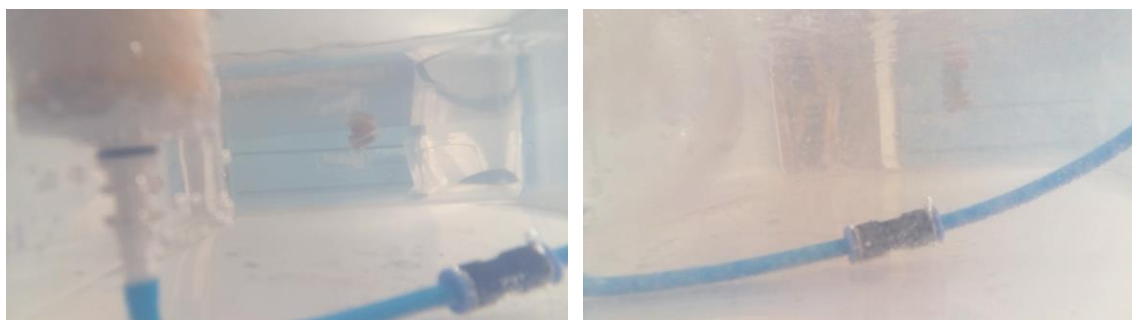
Fuente: Elaboración propia.

- Generación de microburbujas laminar

Con el diseño burbujeador de flujo laminar, se aprecia mucho mejor la nubosidad y blanqueamiento del agua, ya que se distribuyen mejor las burbujas por mayor parte del tanque, además de generar en la superficie una formación parecida a espuma, lo cual también es una señal de presencia de microburbujas. mostrando su ejecución en las figuras 47, donde el agua está en reposo, sin generación de

microburbujas vs generación de microburbujas, donde se aprecia y puede comparar con respecto al reposo, el blanqueamiento del agua y figura 48 donde se muestra la efervescencia y espumosis, sin embargo, sus efectos son más notables en los lodos como se mostrará más adelante en la evidencia del beneficio del uso de las microburbujas en sedimentos.

Figura 47: Microburbujeador laminar, a la izquierda agua en reposo y sin microburbujas, vs a la derecha agua con microburbujas



Fuente: Elaboración propia

Figura 48: Efervescencia y espumosis al generar microburbujas



Fuente: Elaboración propia.

3.3 Evidencia del beneficio del uso de las microburbujas en sedimentos

Aunque los siguientes resultados solo podrán ser evaluados visualmente, ya que no se cuenta con acceso a laboratorios de la universidad, ni sus implementos, y por lo cual no podrá cuantificarse los resultados, aunque la mejoría es claramente resaltante a nivel visual.

Las pruebas realizadas a continuación se hicieron de manera controlada para permitir diferenciar los beneficios de la aplicación entre un material y otro, en los tres casos se presentan las siguientes similitudes en las pruebas:

- La bomba utilizada fue de $\frac{1}{2}$ HP (según especificación de la bomba).
- La presión de aire en el generador era de 30 psi(2 bar).
- El caudal de aire al generador era de $\frac{3}{4}$ L/min(según especificación del regulador).
- Pruebas realizadas con agua resultante luego de un paso por el hidrociclón.
- Exposición a las microburbujas de 3 minutos.
- Se utilizó el microburbujeador de flujo de agua lineal.

3.3.1 Resultados de la aplicación de micro burbujas en arena

La aplicación de microburbujas en arena denota una leve disminución de la concentración de arena en la muestra extraída como se evidencia en la figura 49, sin embargo, se evidencio que esta arena se precipita al fondo apresuradamente, por lo que no se evidencia un beneficio significativo de las microburbujas en cuanto a la separación de los sedimentos llevándolos a la superficie en el tanque de aplicación de microburbujas y además es posible que al momento de la extracción de la muestra los sedimentos no sean elevados por las burbujas y se extraiga una muestra errónea de lo que las microburbujas hacen.

Figura 49: Aplicación de microburbujas a arena, al lado izquierdo mezcla extraída después de un paso por el hidrociclón y al lado derecho agua luego de un paso por el hidrociclón y aplicación de las microburbujas



Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Resultados de la aplicación de microburbujas en sedimentos de café

En la aplicación de microburbujas a la mezcla de agua-café, proveniente del hidrociclón, se evidenció mejoría, es decir una disminución en cuanto a la concentración de sedimentos como en la coloración del agua, ya que, aunque es tenue, existe una claridad en el recipiente de muestra obtenido del agua después de la aplicación de las microburbujas, como se evidencia en la figura 50.

Figura 50: Muestra del cambio luego de la aplicación de las microburbujas(café), al lado izquierdo muestra de un paso por el hidrociclón únicamente y al lado derecho muestra después de un paso por el hidrociclón y aplicación de microburbujas

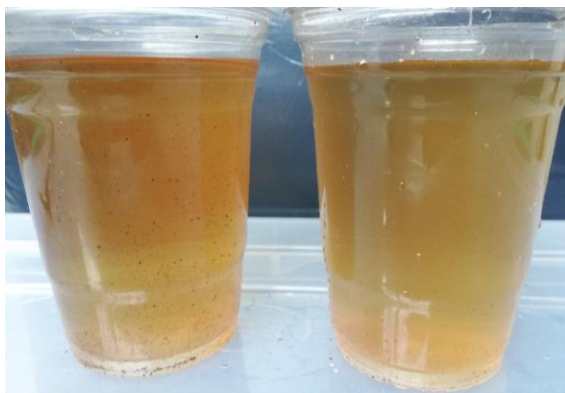


Figura: Elaboración propia.

Se observó que la aplicación de las microburbujas en el tanque generaba que los sedimentos subieran a la superficie a diferencia de una parte del tanque donde no se aplicó microburbujas, este fenómeno se observa en la figura 51.

Figura 51: Muestra de cambio en el tanque luego de aplicación de microburbujas, toda el agua en el tanque ya ha tenido un paso por el hidrociclón, al lado izquierdo la parte del tanque sin microburbujas, al derecho aplicación de microburbujas



Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 Resultados de la aplicación de microburbujas en sedimentos con lodo

La aplicación de las microburbujas a la mezcla de agua-lodo, evidencia una mejoría, al igual que la prueba anterior, tanto en la cantidad de sedimento como en la turbidez y coloración del agua posterior al tratamiento de microburbujas, cabe decir que es realmente notoria su transparencia parcial, esta mejoría se logra ver en las muestras de la figura 52.

Figura 52: Muestra del cambio después de microburbujas en lodo, Lado izquierdo mezcla luego de un paso por el hidrociclón, al lado derecho agua con un paso por el hidrociclón y tratada con microburbujas



Fuente: Elaboración propia.

3.3.4 Aplicación de microburbujas a los sedimentos seleccionados

Los sedimentos que se seleccionaron finalmente teniendo en cuenta su progreso en el tratamiento primario con microburbujas, como mejor resultado, fue en la mezcla de agua-tierra o lodo común, esto debido a la suspensión y disolución de sus elementos sólidos en un inicio, los cuales muestran el trabajo del hidrociclón separando cierta cantidad de sólidos, en cuanto a la aplicación de microburbujas, es notable que estas microburbujas ayudan a facilitar la extracción de los sólidos, y su mejora se puede evidenciar progresivamente en la figura 53, se tiene una mejoría desarrollada en el agua tratada a través de los procesos de desarenado y aplicación de microburbujas.

Figura 53: Cambio progresivo en el agua con sedimentos por tierra común, cambios progresivos; al lado derecho mezcla para reinicio de procesos, en el centro mezcla luego de un paso por el hidrociclón y al lado izquierdo resultado luego de un paso por el hidrociclón y aplicación de microburbujas



Fuente: Elaboración propia.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- De acuerdo a los resultados consultados de diversos proyectos se resalta que la aplicación de microburbujas es favorable para la eliminación de materia orgánica y lodos en el tratamiento primario de aguas residuales, al punto de encontrar la oferta de equipos para generación de microburbujas en la industria enfocados al tratamiento de aguas, aunque demandan altas inversiones para su adquisición e implementación.
- El prototipo de sistema diseñado para el tratamiento primario de aguas residuales bajo operación continua, con un flujo volumétrico de trabajo de 23 L condicionado por el hidrociclón, comprende una etapa de sedimentación y una etapa de microburbujeo, el cual contiene dos equipos de bombeo (una para el desarenado y otra para el microburbujeo), y tres tanques transparentes (mezcla inicial, aplicación de microburbujas y resultados de microburbujeo) que posibilita la inspección visual y el análisis del proceso de tratamiento paso a paso
- Se diseñó un sistema de control de nivel en el tanque de agua-sedimentos, aunque puede ser igualmente aplicado para el tanque generador de microburbujas, para permitir la circulación del agua constantemente y controlada según la cantidad de mezcla agua-sedimentos ingresados al sistema. Se evidencio que es necesario aplicar e implementar este control de nivel y recirculación ya que las bombas de agua requieren de un caudal de ingreso constante, para así, proveer el agua y sedimentos al hidrociclón y microburbujeador respectivamente sin correr riesgo de daños.
- El prototipo que se implementó tiene una mejoría progresiva en el tratamiento primario de la mezcla que se ingresa, la disposición del sistema es adecuada y la manera en que se implementó el generador de microburbujas dentro del prototipo permite evidenciar el resultado que causa sobre el mejoramiento en las propiedades de la mezcla agua-sedimentos después de un paso por el tratamiento primario.

- El prototipo del sistema para tratamiento primario de agua residual desarrollado incluye un proceso de eliminación de sólidos gruesos mediante un sedimentador hidrociclón y una etapa de retiro de sedimentos finos mediante la aplicación de microburbujas. La operación completa del sistema permitió evidenciar visualmente una disminución en los sólidos presentes en el agua con un solo paso por el sistema en comparación con el paso único del agua residual por el sedimentador hidrociclón.
- La realización de pruebas empleando agua residual simulada a partir de la adición de partículas de café o lodo, permitió evidenciar la disminución de material sólido en el agua al pasar en el sistema prototipo de tratamiento primario, lo cual se asocia a que las microburbujas provocan un flujo ascendente ocasionando que los sólidos disueltos y algunos en suspensión suban a la superficie y en algunos casos se aglomeren, permitiendo así ser extraídos del agua. En el caso de agua con partículas de arena (tercera prueba) se observó que debido a la densidad y/o tamaño promedio de las partículas de este material se presentó una velocidad de sedimentación mayor en el agua y se acumuló en el fondo, lo cual no permitió evaluar adecuadamente la incidencia de las microburbujas.
- Los ensayos realizados en el prototipo del sistema de tratamiento primario de aguas residuales empleando tres tipos materiales diferentes, posibilitó evidenciar que la aplicación de microburbujas permite mejorar la eliminación de sólidos presentes en el agua y, por ende, obtener mejores características físicas del agua efluente del sistema como son coloración y turbidez, a pesar de que debido a los temas coyunturales actuales, estos parámetros no se lograron medir por los procedimientos establecidos.

4.2 Recomendaciones

Medición.

- Ya que debido a la falta de acceso a implementos y equipos de estudio, lastimosamente, por la actual pandemia covid-19, no fue posible analizar detallada y estrictamente las características de cada resultado, es oportuno recomendar que estas mediciones de color, turbidez y otras características, se hagan con métodos y equipos, como por ejemplo: Método platino-cobalto, comparación por discos coloreados, efecto tyndall, la opacidad o índice de difusión, métodos capaces de cuantificar cifras para tener una conclusión mucho más certera.

Diseño

- Puede mejorarse el diseño de los generadores de microburbujas y en especial del hidrociclón, elaborando y haciendo pruebas con otros materiales o métodos de construcción, como aluminio, ya que con la impresión 3D, se generan pequeñas fugas de agua o presión.
- Análisis de pruebas de hidrociclón, con diferentes longitudes de cilindro y cono, ya que esto podría favorecer su eficiencia.
- Establecer una pieza o aditamento para la mejoría de la canalización o distribución de las microburbujas en el área de trabajo de estas.

Desarrollo

- En cuanto a elementos como bombas, podría darse favorecimiento a la eficiencia de los generadores de microburbujas e hidrociclón, si se trabaja con presiones y caudal diferentes.
- Incluir en el desarrollo un sistema de recirculación de lodos y aguas, eficiente, para la simulación exacta de un proceso en funcionamiento continuo.
- Incluir el sistema de control de nivel, para no tener problemas de rebose de las aguas en los tanques.

Bibliografía

1. Deendarlianto, Intan Supraba, Akmal Irfan Majid, Muhammad Reza Pradecta, Indarto, Adhika Widyaparaga, Experimental investigation on the flow behavior during the solid particles lifting in a micro-bubble generator type airlift pump system [versión electrónica], Elsevier, Case Studies in Thermal Engineering, Vol13, (2019).
2. Liming Hu, Zhiran Xia, Application of ozone micro-nano-bubbles to ground water remediation, Elsevier, Journal of Hazardous Materials, Vol342, (2018), 453.
3. Ingrid G. Chávez, 2017, Diseño e implementación de un sistema de tratamiento de Aguas residuales, Tesis de pregrado [versión electrónica], Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador
4. Yu, S., Shangguan, Y., Gong, C., Wang, Y., Review of Microbubble and its Applications in Ozonation, Earth and Environmental Science, 2018.
https://www.researchgate.net/publication/323981566_A_Review_of_Microbubble_and_its_Applications_in_Ozonation.
5. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, (2017), Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS, recuperado (2019,07,15),
<https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>
6. ONU, (2013), Objetivo 6: garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible en el saneamiento para todos, recuperado (2019,07,08), <https://onu.org.pe/ods-6/>
7. Energiverde, 2016, la importancia y los tratamientos de aguas residuales, <http://www.energiverde.com/agua-2/la-importancia-y-los-tratamientos-de-aguas-residuales>
8. Hernández., Quinta M., Depuración y desinfección de aguas residuales [versión electrónica], Vol. 6, 2015, España.
9. Vargas, N., García, M., IDEAM, Reporte de avance del Estudio Nacional del Agua, 2018
http://www.andi.com.co/Uploads/Cartilla_ENA_%202018.pdf
10. Seoanez, M., 2004, Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo, Mundi prensa, <https://www.casadellibro.com/libro-depuracion-de-las-aguas-residuales-por-tecnologias-ecologicas-y-d-e-bajo-costo/9788484762263/998963>.
11. Argandoña, E., Macías R., 2013, Universidad Técnica De Manabí Facultad De Ciencias Matemáticas, Determinación de sólidos totales, suspendidos, sedimentados y volátiles, provincia de Manabí, Ecuador,
<https://es.scribd.com/document/346617009/Determinacion-de-Solidos-Totales-Suspendidos-Sedimentados-y-Volatiles>.
12. De la torre, María, Evaluación de la implementación de un sistema de clarificación de aguas residuales previo al tratamiento secundario en la ptar de albateq s.a. María Camila de la Torre Díaz, Bogotá D.C. Fundación Universidad América, 2017
<http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6041/1/6121858-2017-1-IQ.pdf>
13. IDEAM, Informe del estado del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables 2012, 2013 y 2014, Bogotá, 2015 <http://documentacion>

- [.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023237/IEARN tercera parte calidad recursos 2014.pdf](http://ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023237/IEARN_tercera_parte_calidad_recursos_2014.pdf)
14. Resolución 0631 de 2015 ministerio de ambiente, Colombia.
 15. La Ley 373 de 1997 ministerio de ambiente, Colombia.
 16. El Decreto 1076 de 2015 (Decreto 3930 de 2010) ministerio de ambiente, Colombia.
 17. Mihelcic, J., Zimmerman, J., 2011, Ingeniería ambiental: fundamentos sustentabilidad diseño
 18. Cruz, J., 2014, Tratamiento de aguas residuales [Version electronica], Pontificia Universidad Javeriana, Colombia
[https://www.sic.gov.co/sites/default/files/files/Propiedad%20Industrial/Boletines Tecnologicos/Boletin Tratamiento aguas 20140624.pdf](https://www.sic.gov.co/sites/default/files/files/Propiedad%20Industrial/Boletines_Tecnologicos/Boletin_Tratamiento_aguas_20140624.pdf)
 19. ING Cardenas, Y., 2000, Tratamiento de agua coagulación y floculación,. Lima, Peru..
http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154
 20. Fibras y normas de Colombia SAS, 2004, Tipos de tratamiento de aguas residuales,
<https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/tipos-tratamiento-aguas-residuales/#Aguas-Residuales>
 21. ING Perez Jorge, 2007, Universidad nacional Facultad de minas, tratamiento de aguas,
[http://www.bdigital.unal.edu.co/70/5/45 - 4 Capi 3.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/70/5/45-4-Capi-3.pdf)
 22. Arismendy, J., Medellín (2013) Evaluación del proceso de clasificación de sólidos en un hidrociclón industrial, universidad pontificia bolivariana.
 23. Ing Chica, L., 2009, Estudio del cortocircuito de finos en hidrociclones operados con suspensiones poliminerales en la industria cementera, U. Nacional.
<http://bdigital.unal.edu.co/2461/1/39192498.2009.pdf>
 24. Medina, Hilda, 1997, espesamiento de los lodos de un sedimentador primario por medio de hidrociclones en una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, Universidad autónoma de nuevo Leon, México
<http://eprints.uanl.mx/4956/1/1080071209.PDF>
 25. Beltran, C., 2012, Aplicación de microburbujas en la flotación de lodos de tratamiento de aguas ácidas de mina, Parte II: Flotación
http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S207855932012000200003&lng=es&nrm=iso
 26. Díaz, J, Blandón, Forero, J., Diseño de un nuevo sistema de flotación para tratamiento de aguas industriales, Instituto Colombiano del Petróleo, 4185, Bucaramanga, Santander, Colombia.
 27. Centro de ayuda Matlab, 2019, [Descripción del producto MATLAB](https://la.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html) y características
https://la.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html
 28. Lopez, D., 2006, Matlab con aplicaciones a la ingeniería, física, y finanzas, Alfaomega, Buenos Aires, Argentina.
 29. Mathworks, Image Processing Toolbox, The MathWorks, 1994-2020
https://la.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html
 30. Solidworks, Qué es y para qué sirve, Consultado 2019, <https://solid-bi.es/solidworks/>

-
31. Solidworks, 2020 ,Simulacion solid Works, [Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, https://www.solidworks.es/sw/resources/videos/solidworks-simulation-solutions.htm](https://www.solidworks.es/sw/resources/videos/solidworks-simulation-solutions.htm)
 32. PTAR Salitre, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, mayo 2017 <https://www.youtube.com/watch?v=WaQD8JU76hg>
 33. Flores, E., 1961, Tipos de sistemas de producción, Tratado de Economía Agrícola, Fondo de Cultura Económica, México http://ual.dyndns.org/biblioteca/admon_de_la_produccion/pdf/unidad_04.pdf
 34. Plan-de-tratamiento-de-agua-El-Salitre-ST-493_UNECE.pdf
 35. Monica A., Muriel,D., Vega,I., 2005, Efectos de las aguas residuales y Lixiviados en reactores de lodos activados a escala de laboratorio, Bogotá, Colombia <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021318/021318.htm>
 36. IDEAM, FOPAE, 2004, Estudio de la caracterización climática de Bta. y cuenca del rio Tunjuelo <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21135/CARACTERIZACION+CLIMATICA+BOGOTA.pdf/d7e42ed8-a6ef-4a62-b38f-f36f58db29aa>