

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EQUIPO DE PRUEBA DE
JARRAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS**

Presentado por:

Alvaro Felipe Escobar Patiño

Jamer Oswaldo Chala Ramirez

Corporación universitaria del Huila - Corhuila

Ingeniería Mecatrónica

Neiva - Huila

2022

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS PARA LA TRATABILIDAD DE AGUAS

Alvaro Felipe Escobar Patiño

Jamer Oswaldo Chala Ramirez

Director:

MsC. Jorge Luis Aroca Trujillo

Codirector:

MsC. Luis Carlos Losada Benavides

Corporación universitaria del Huila - Corhuila

Ingeniería Mecatrónica

Neiva - Huila

2022

Índice

Introducción	1
Descripción del trabajo	2
Justificación	3
Marco teórico	4
Agua	4
Parámetros físicos del agua	4
Turbidez	5
Color	5
Material Coloidal	6
Propiedades de los coloides	7
Estabilidad y desestabilización de los coloides	8
Tratamiento de aguas	9
Pruebas de tratabilidad	14
Diseño del sistema de agitación	18
Sistema de control PID	24
Objetivos	25
Objetivo general	25
Objetivos específicos	25
Metodología	26
Presupuesto	28
Cronograma	30
Bibliografía	31

Índice de figuras

1.	Material Coloidal [Suárez Oquendo y Trujillo Villa (2011)]	6
2.	Partícula Coloidal [Suárez Oquendo y Trujillo Villa (2011)]	7
3.	Etapas de la coagulación [LÍQUIDO-GAS (2005)]	11
4.	Equipo de Jarras [Bautista Arias y Sánchez Montaluisa (2014)]	14
5.	Base iluminada[Martínez Delgadillo (1999)]	17
6.	Equipo de agitación [Verdugo Leal y cols. (2013)]	19
7.	Tipos de rodetes [Rizo Ulacia (2012)]	23

Índice de tablas

1.	Presupuesto del proyecto.	29
----	-----------------------------------	----

Introducción

La presente propuesta se pretende diseñar e implementar un equipo de prueba de jarras para el tratamiento de aguas. Para ello, se inicia con contenidos que ayuden al lector entender las generalidades del tema, exponiendo consideraciones básicas sobre los tratamientos de aguas y de las etapas de la coagulación, mecánica del proceso y sistema de agitación. Más adelante se expondrá el tema de prueba de tratabilidad, funciones de la agitación y las trayectorias del flujo de la agitación. Con lo anterior se pretende dar a conocer las características teóricas y prácticas para el desarrollo de las prueba de tratabilidad o ensayo de jarras en muestras de aguas, con el fin de simular el proceso a nivel laboratorio.

Seguidamente, se abordarán contenidos relacionados con el equipo. De esta forma, se mostrará temas relacionados con los sistemas mecánicos, eléctrico y de control, que permitirán realizar la implementación del equipo.

La presente propuesta pretende obtener una herramienta en la cual se pueda realizar las pruebas (prueba de jarras) de laboratorio donde se pueda determinar la dosis óptima de químicos para los procesos de coagulación y floculación en una planta de tratamiento de aguas.

Descripción del trabajo

Con el desarrollo de la presente propuesta se quiere tener un equipo que brinde la acción de mezclado a una velocidad constante, de acuerdo a los requerimientos del usuario. Para lograr esto, se necesita diseñar y construir el sistema mecánico (planta) que posea transmisiones de movimiento igual en todas las aspas, un sistema de control de lazo cerrado en el cual se pueda controlar las diferentes velocidades de la prueba, una alarma de terminación del ciclo e incorporar lamparas que permitan visualizar el proceso.

Justificación

Partiendo de un conocimiento general, es de gran importancia contar con agua tratada de buena calidad, ya sea para ser usada en el consumo del hogar o en la industria en general. En Colombia la resolución 2115 de 2007 del Ministerio de la protección social, Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, determina las características que debe tener el agua para el consumo en general, así como las características físico-químicas, mecanismos y periodicidad de control y vigilancia para la calidad de la misma. Dentro de estos mecanismos esta el llamado *Test de Jarras* implementado en laboratorios, para determinar las condiciones de operaciones óptimas usadas para el tratamiento de aguas. Este test nos permite ajustar el pH, hacer variaciones en la dosis de las diferentes sustancias químicas que se añaden a la muestra y alternar velocidades de mezclado. Por lo anterior, se pretende construir una herramienta que ayude al experto a realizar el análisis correcto mediante la acción de mezclado y el tiempo de retención para coagular y flocular los sólidos en el agua; Del mismo modo este equipo innovador tendrá una ventaja exponencial puesto que es un sistema fabricado a menor costo en comparación a los existentes en el mercado, con lo cual se busca poder brindar una herramienta cómoda y accesible al programa de Ingeniería Ambiental de la Corporación Universitaria del Huila para realizar dichas pruebas en los laboratorios de la institución.

Marco teórico

Agua

El agua es una sustancia que en su composición cuenta con un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrógeno. Es un líquido que naturalmente se encuentra sin olor, desabrido y sin color. El 70 por ciento de la superficie del planeta está cubierta de agua en estado líquido y, de ella, alrededor del 96 por ciento corresponde al agua salada que compone los océanos. El resto del porcentaje equivale al agua dulce que se distribuye en un 70 por ciento en agua congelada en glaciares y un 30 por ciento en la humedad del suelo. En las industrias de igual manera se necesitan grandes cantidades de agua de calidad para poder funcionar. Sin ellas, la mayor parte de la actividad humana se imposibilita, ya que no se podrían producir la mayoría de los productos que utilizamos a diario. En algunas industrias, el agua que se utiliza pasa a formar parte de su resultado final. El 28 de julio de 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas organismo que hace parte de la (ONU) distinguió el agua potable y el saneamiento básico como un derecho humano fundamental para una vida digna en el planeta. Este organismo internacional ya estimaba que aproximadamente 884 millones de personas no contaban con acceso a agua apta para el consumo humano y con esta resolución, los países de todo el mundo se comprometieron a proporcionar los medios necesarios para ayudar a las comunidades más vulnerables a disponer de suministro de agua y saneamiento básico y accesible para todos. [Martos-López (2016)]

Parámetros físicos del agua

Las sustancias que son interesantes es en el proceso de la coagulación y floculación son la turbiedad y el color en forma de partículas muy pequeñas o coloides, material que no puede ser eliminado mediante un proceso de sedimentación simple.

El pH influye en aspectos importantes que ocurren en el agua, como la corrosión y las incrustaciones en las redes de distribución. Se podría decir que no tiene efectos directos sobre la salud humana, pero sí puede influir en los procesos de tratamiento del agua en

general, como la coagulación y la desinfección. Por lo general, las aguas sin contaminantes tienen un pH en el rango de 6 a 9. Cuando se tratan aguas ácidas, es común la adición de un álcali (Óxido o hidróxido metálico soluble en agua que tiene reacción básica, por lo general, cal) para optimizar los procesos de coagulación. En el tratamiento del agua de consumo, se requerirá volver a ajustar el pH del agua hasta un valor potable.

Turbidez

La turbidez es una medida en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos en suspensión tenga el agua, más sucia parecerá ésta y más alta será la turbidez. La turbidez es considerada una buena medida de la calidad del agua. Las partículas suspendidas absorben calor de la luz del sol, haciendo que las aguas turbias se vuelvan más calientes, y así reduciendo la concentración de oxígeno en el agua (el oxígeno se disuelve mejor en el agua más fría). Además, algunos organismos no pueden sobrevivir en agua más caliente.

Los contaminantes causantes de turbiedad en el agua son las partículas en suspensión, tales como arcilla, minerales, sedimento, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, plancton y otros organismos microscópicos. Los tamaños de las partículas varían desde partículas coloidales hasta partículas más grandes. La arcilla es quizás la causa más común de turbiedad en las aguas. Comúnmente entendemos por arcilla un material natural, terroso, de gránulos muy finos, que se vuelve plástico cuando se mezcla con cierta cantidad de agua. Varios análisis de arcilla han demostrado que ésta se compone principalmente de sílice, aluminio y agua, frecuentemente con cantidades apreciables de hierro, álcalis y tierra alcalina. [Guzmán, Villabona, Tejada, y García (2013)]

Color

Esta característica del agua puede estar ligada a la turbidez, se atribuye comúnmente a la presencia de taninos, lignina, ácidos húmicos, ácidos grasos, ácidos fúlvicos, etc. Se considera que el color natural del agua puede originarse por las siguientes causas: • la

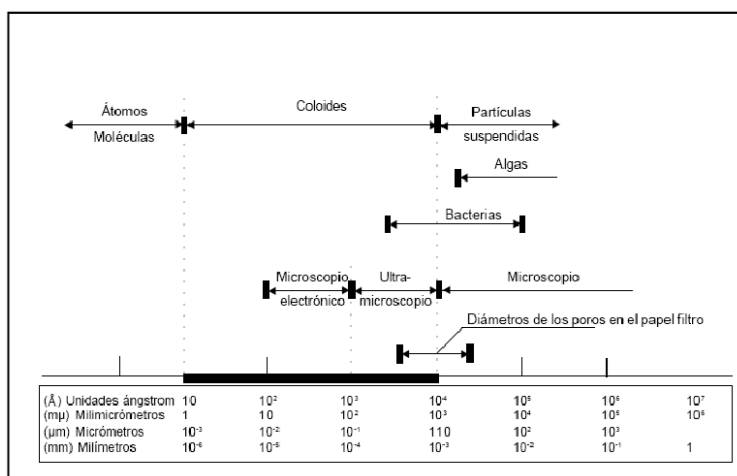
descomposición de la materia; • la materia orgánica del suelo; • la presencia de hierro, manganeso y otros compuestos metálicos En la formación del color en el agua intervienen, entre otros factores, la temperatura, la materia disponible y la solubilidad de los compuestos coloreados Y el pH.

Material Coloidal

Las partículas coloidales se caracterizan por tener una gran superficie específica, es decir, una gran relación entre el área superficial y la masa. No hay límites definidos de tamaño para las partículas coloidales, pero por lo general se considera que tienen una dimensión entre 1 y 1,000 mμ aproximadamente Los coloides entonces tienen un tamaño intermedio entre las partículas en solución verdadera y las partículas en suspensión. Los límites enumerados en la Figura son aproximados, ya que el tamaño y la naturaleza del material son los que determinan si la partícula es coloidal. Existen varios términos para distinguir los tipos de sistemas coloidales. En el tratamiento de agua, los más importantes son los hidrofílicos e hidrofóbicos. [Anaissi y cols. (2009)]

Figura 1

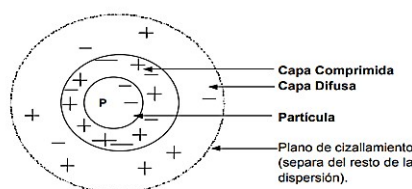
Material Coloidal [Suárez Oquendo y Trujillo Villa (2011)]



Los iones que se adhieren fuertemente a la partícula y se desplazan con ella, forman la capa adherida o comprimida, mientras que los iones que se adhieren débilmente constituyen la

Figura 2

Partícula Coloidal [Suárez Oquendo y Trujillo Villa (2011)]



capa difusa, por lo tanto hay un gradiente o potencial electrostático entre la superficie de la partícula y la solución, llamado Potencial Zeta.

Propiedades de los coloides

Los coloides pueden estudiarse bajo una serie de propiedades. Las principales se presentan a continuación:

- Movimiento Browniano: movimiento constante e irregular de los coloides.
- Difusión: dispersión por alta energía cinética. Responde a la ley de Fick.
- Presión Osmótica: Presión hidrostática que iguala dos medios (agua y sistema coloidal). El paso de agua iguala las concentraciones en ambos medios separados por una membrana semipermeable.
- Propiedades ópticas: Dispersión de la luz (efecto de Tyndall - Faraday): La dispersión de la luz es proporcional al tamaño de las partículas.
- Opalescencia: Las soluciones coloidales son incoloras generalmente.

Sin embargo algunas pueden ser coloreadas. Esto depende de la diseminación de la luz y a la adsorción selectiva bajo cierta longitud de onda.

- Propiedades de la superficie: La superficie específica de los coloides en general es muy alta ya que las partículas son muy pequeñas. Esto permite que tengan una gran capacidad de adsorción de sustancias.

- **Propiedades electrocinéticas:** En este sentido se dice que los coloides en general tienen carga eléctrica y por tanto pueden ser afectados por campos eléctricos. Estas cargas pueden explicarse por la presencia de imperfecciones en la superficie de la estructura reticular. Puede también existir ionización y por tanto la superficie de los coloides puede ionizarse y por último puede haber adsorción preferencial de iones en la superficie de los coloides o bien haber ligandos de coordinación.

Estabilidad y desestabilización de los coloides

Los coloides son normalmente estables en solución. En general priman los factores estabilizantes sobre los desestabilizantes. Entre los factores estabilizantes se cuentan a todas las fuerzas o fenómenos que generan repulsión entre ellos y por tanto, las fuerzas electrostáticas y la hidratación son favorables. Las fuerzas de atracción, en cambio, cumplen un papel opuesto y desestabilizan. Entre ellas la gravedad, el movimiento Browniano y las fuerzas de Van der Waals. Obviamente algunos fenómenos afectan el sistema mucho más que otros. Por ejemplo la influencia de la gravedad es despreciable. La estabilidad de una dispersión coloidal está relacionada con la teoría de la interacción energética entre las partículas como una función de su distancia. Además, las fuerzas electrostáticas de repulsión entre los coloides, pueden actuar las fuerzas de Van der Waals, que son fuerzas de atracción originadas por acción de dipolos permanentes o inducidos en las partículas. Las fuerzas de Van der Waals son independientes de la carga neta de los coloides y no varían con el pH o con otras características de la fase acuosa, pero sólo actúan a distancias muy pequeñas. Al acercarse dos partículas la fuerza de repulsión aumenta para mantenerlas separadas. Si se acercan lo suficiente y sobrepasan la barrera de energía, entonces la fuerza de atracción de Van der Waals predominará y las partículas podrán unirse. Cuando se obtiene esta condición se dice que el coloide se ha desestabilizado.

Tratamiento de aguas

Coagulación

La coagulación y la floculación son métodos que se emplean para remover de las aguas residuales la materia coloidal y la suspendida (tamaño de 1 nm a 0,1 nm). La estabilidad de la materia suspendida se debe a la repulsión entre partículas inducida por el alto potencial zeta (-15 a - 20 mv). Esta materia no sedimenta fácilmente y no puede ser removida por métodos físicos convencionales. Durante la coagulación se desestabilizan los coloides debido a que disminuye el potencial zeta de las partículas mediante la adición de coagulantes. Esta desestabilización se produce por el contacto que se establece entre las partículas suspendidas (coloidales) y los microfloculos de carga positiva de fierro o de aluminio. El punto óptimo para la coagulación es cuando el potencial zeta alcanza su más bajo nivel, o punto isoelectrico, que es cuando las fuerzas de Van der Waals prevalecen.

Coagulantes utilizados

Los componentes son productos químicos que al adicionar al agua son capaces de producir una reacción química con los componentes químicos del agua, especialmente con la alcalinidad del agua para formar un precipitado voluminoso, muy adsorbente, constituido generalmente por el hidróxido metálico del coagulante que se está utilizando.

El proceso más clásico para la desestabilización de las partículas coloidales se basa en el uso de reactivos químicos a los que se denominan coagulantes. Estos pueden ser:

- Basados en Aluminio: *Sulfato de aluminio* $Al_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$, *Polihidroxiclорuro de aluminio* $Aln(OH)_mCl_{3n-m}$ y *Aluminato sódico* $NaAlO_2$.
- Basados en Hierro: *Sulfato férrico* $Fe_2(SO_4)_3$, *Cloruro férrico* $FeCl_3$ y *Sulfato ferroso* $FeSO_4$
- Basados en Calcio: *Cloruro cálcico* $CaCl_2$ y *Hidróxido cálcico* $Ca(OH)_2$.

- Basados en magnesio: *Cloruro de magnesio $MgCl_2$*

Una vez que las partículas coloidales han sido desestabilizadas, ya pueden unirse o agregarse. También se usan reactivos químicos constituidos por polímeros. Dependiendo del monómero de partida y de su carga pueden ser:

- No iónicos: *Poliacrilamidas y Polímeros del óxido de etileno.*
- Aniónicos: *Copolímero de acrilamida-acrilato, Poliacrilamida parcialmente hidrolizada y Polisulfónicos.*
- Catiónicos: *Polietilenamina, Polimetacrilato y Copolímeros de acrilamida con grupos amonio cuaternarios*

La floculación hace que se formen conglomerados de partículas coloidales de mayor tamaño cuando se establecen puentes químicos entre ellas; de esta manera forman estructuras fácilmente sedimentables que pueden removerse mediante sedimentación, flotación o filtración. Cuando a la muestra que se va a sedimentar se adiciona un coagulante en una dosis menor a la óptima, no se forman flóculos o, si se forman, son tan pequeños que le dan a la muestra una apariencia turbia. Si es al contrario, o sea, si el coagulante que se le añade es excesivo, se forma un floculo muy denso pero frágil y esponjoso que se puede romper al agitar, lo que dificulta la sedimentación. Un buen floculo es de apariencia pesada y compacta, además de que inmediatamente después de haberle agregado

Etapas o fases de la coagulación

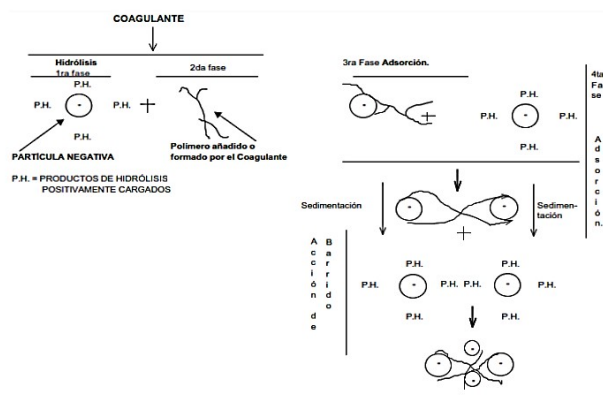
El proceso de coagulación se desarrolla en un tiempo muy corto (casi instantáneo), en el que se presenta las siguientes etapas.

- Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas en suspensión.
- Formación de Compuestos químicos poliméricos.
- Adsorción de cadenas poliméricas por los coloides.

- Adsorción mutua de coloides.
- Acción de barrido.

Figura 3

Etapas de la coagulación [LÍQUIDO-GAS (2005)]



Factores que influyen en la coagulación

Influencia del pH: El pH es la variable más importante a tener en cuenta al momento de la coagulación, para cada agua existe un rango de pH óptimo para la cual la coagulación tiene lugar rápidamente, ello depende de la naturaleza de los iones y de la alcalinidad del agua.

El rango de pH es función del tipo de coagulante a ser utilizado y de la naturaleza del agua a tratar; si la coagulación se realiza fuera del rango de pH óptimo entonces se debe aumentar la cantidad del coagulante; por lo tanto la dosis requerida es alta. Para sales de aluminio el rango de pH para la coagulación es de 6,5 a 8,0 y para las sales de hierro, el rango de pH óptimo es de 5,5 a 8,5 unidades.

Influencia de la Temperatura del Agua: La variación de 1C en la temperatura del agua conduce a la formación de corrientes de densidad (variación de la densidad del agua) de diferentes grados que afectan a la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta; temperaturas muy elevadas desfavorecen igualmente

a la coagulación. Una disminución de la temperatura del agua en una unidad de decantación conlleva a un aumento de su viscosidad; esto explica las dificultades de la sedimentación de un floc.

Influencia de la Dosis del Coagulante: La cantidad del coagulante a utilizar tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación, así: Poca cantidad del coagulante, no neutraliza totalmente la carga de la partícula, la formación de los microflóculos es muy escasa, por lo tanto la turbiedad residual es elevada. Alta cantidad de coagulante produce la inversión de la carga de la partícula, conduce a la formación de gran cantidad de microflóculos con tamaños muy pequeños cuyas velocidades de sedimentación muy bajas, por lo tanto la turbiedad residual es igualmente elevada. La selección del coagulante y la cantidad óptima de aplicación; se determina mediante los ensayos de pruebas de jarra.

Influencia de Mezcla: El grado de agitación que se da a la masa de agua durante la adición del coagulante, determina si la coagulación es completa; turbulencias desiguales hacen que cierta porción de agua tenga mayor concentración de coagulantes y la otra parte tenga poco o casi nada; la agitación debe ser uniforme e intensa en toda la masa de agua, para asegurar que la mezcla entre el agua y el coagulante haya sido bien hecho y que se haya producido la reacción química de neutralización de cargas correspondiente. En el transcurso de la coagulación y floculación, se procede a la mezcla de productos químicos en dos etapas. En la primera etapa, la mezcla es enérgica y de corta duración (60 seg., máx.) llamado mezcla rápida; esta mezcla tiene por objeto dispersar la totalidad del coagulante dentro del volumen del agua a tratar, y en la segunda etapa la mezcla es lenta y tiene por objeto desarrollar los microflóculos. La mezcla rápida se efectúa para la inyección de productos químicos dentro de la zona de fuerte turbulencia, una inadecuada mezcla rápida conlleva a un incremento de productos químicos.

Floculación

La floculación es un proceso que sigue a la coagulación, consiste en la agitación de la masa coagulada que permite el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad. Estos flóculos inicialmente pequeños, crean al juntarse aglomerados mayores que son capaces de sedimentar

Mecánica del proceso

Normalmente, la floculación se analiza como un proceso causado por la colisión entre partículas. En ella intervienen, en forma secuencial, tres mecanismos de transporte:

- Floculación pericinética o browniana. Se debe a la energía térmica del fluido.
- Floculación ortocinética o gradiente de velocidad. Se produce en la masa del fluido en movimiento.
- Sedimentación diferencial. Se debe a las partículas grandes, que, al precipitarse, colisionan con las más pequeñas, que van descendiendo lentamente, y ambas se aglomeran.

Al dispersarse el coagulante en la masa de agua y desestabilizarse las partículas, se precisa de la floculación pericinética para que las partículas coloidales de tamaño menor de un micrómetro empiecen a aglutinarse. El movimiento browniano actúa dentro de este rango de tamaño de partículas y forma el microflóculo inicial. Recién cuando este alcanza el tamaño de un micrómetro empieza a actuar la floculación ortocinética, promoviendo un desarrollo mayor del microflóculo. Este mecanismo ha sido estudiado en lugares donde la temperatura baja alrededor de cero grados, rango dentro del cual el movimiento browniano se anula y, por consiguiente, también lo hace la floculación pericinética. En este caso, se comprobó que la floculación ortocinética es totalmente ineficiente y no tiene importancia

alguna sobre partículas tan pequeñas. Camp y Stein fueron los primeros en determinar que para fines prácticos, era necesario añadirle turbulencia al proceso y generalizaron la ecuación de Smoluchowski para incluir las condiciones de flujo turbulento.

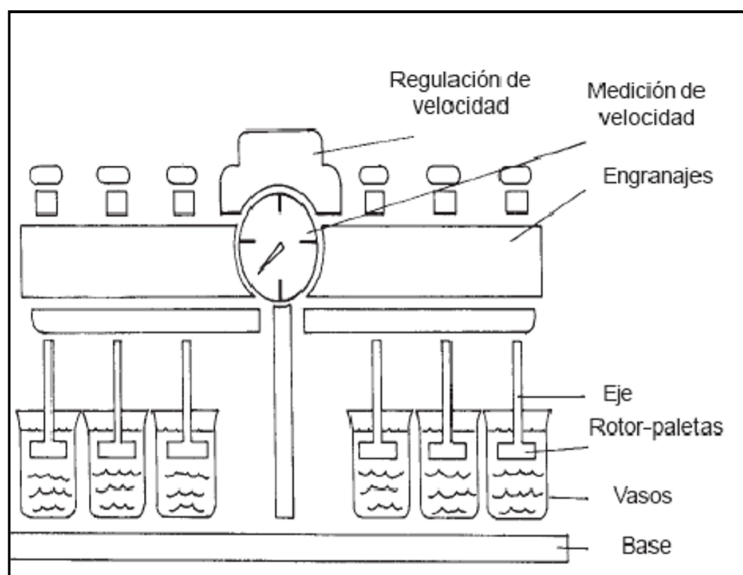
Pruebas de tratabilidad

Prueba de jarras

Es un método de simulación de los procesos de Coagulación y floculación, realizado a nivel de laboratorio que permite obtener agua de buena calidad, fácilmente separable por decantación; los flóculos formados con diferentes dosis del coagulante dan como resultado valores de turbiedad diferentes. G. W. Fuller, J. Cairol y E. Theirault son precursores de la prueba de jarras como modelo predictivo. Probablemente el primer ensayo de prueba de jarras fue realizado por W. L. Langelier en la Universidad de California en 1918. Las primeras aplicaciones y el desarrollo inicial corresponden a John Baylis, Bartow y Petterson, Fleming, Nolte y Kromer.

Figura 4

Equipo de Jarras [Bautista Arias y Sánchez Montaluisa (2014)]



Aportes tecnológicos posteriores fueron realizados por Tolman, Nickel, Gekershausen,

Langelier–Ludwig, Cross et al., C. Henry, Smith, Straub, Elliassen, Norcon, Cox y otros, que perfeccionan continuamente el ensayo y lo aplican con éxito a diversas condiciones de coagulación de las aguas. Estos autores orientaron principalmente el modelo de prueba de jarras hacia la determinación y optimización de las variables químicas del proceso de coagulación.

Descripción del equipo de prueba de jarras

Para efectuar los ensayos de simulación de procesos, existen algunas variaciones en el equipo tradicional, que son descritas en la literatura. Aunque no es un requisito indispensable, estas pruebas, en la mayor parte de los casos, son realizadas en equipos comerciales y uno de los más conocidos es el equipo de velocidad variable fabricado por la Phipps & Bird, para el cual se han desarrollado los ábacos que relacionan el gradiente de velocidad con la velocidad de rotación de las paletas.

Normalmente estos equipos constan de los siguientes elementos:

- Un agitador mecánico provisto con tres a seis paletas, capaz de operar a velocidades variables (de 0 a 100 revoluciones por minuto; actualmente pueden obtenerse equipos que operan con velocidades de hasta 400 revoluciones por minuto).
- Un iluminador de flóculos localizado en la base del agitador del equipo.
- Vasos de precipitado de 2 L. de capacidad, de cristal refractario.

Sistema de agitación

La variable que más importancia tiene en la prueba de jarras es la intensidad de agitación expresada como gradiente de movimiento del agua. Se utilizan paletas o rotores, accionados en forma mecánica o magnética, y pueden utilizarse una o más paletas. En el cuadro se detallan las características de las paletas.

Características de agitadores

Cuando no se utilizan estatores, es necesario elevar la velocidad a valores superiores a los que normalmente operan los equipos. La inercia producida durante el ensayo de floculación ocasiona la formación de un helicoide que afecta el proceso y que se evidencia en una disminución de la eficiencia en el ensayo de sedimentación. Por esta razón, se recurre al uso de estatores o deflectores fijos de tipo continuo o discontinuo.

Descripción de jarras

Las jarras o vasos que se van a usar deben poder ser acomodados en el aparato y tener 2.000 mL. de capacidad; en caso de no tenerse vasos de este tamaño, podría optarse por vasos de 1.000 mL. Se debe evitar usar vasos más pequeños debido a la dificultad en la adición de pequeños volúmenes de coagulantes y ayudantes para obtener muestras satisfactorias del agua sedimentada. Podrían usarse botellas cuadradas, pero antes deben asegurarse las modificaciones producidas por cambio de secciones para el cálculo de gradientes. Para el diseño de las jarras se debe tener en cuenta un factor de seguridad para evitar que se derrame el líquido a tratar como se muestra en la siguiente ecuación: Se parte de un volumen de 1 L. con el factor de corrección o de seguridad de 0,15, en relación al volumen total, tenemos:

$$e^{i\pi} + 1 = 0$$

$$e^{i\pi} + 1 = 0(1)$$

Donde: V = volumen corregido, f_s = factor de seguridad y V_r = volumen real.

El factor de seguridad se lo utiliza ya que la altura de la jarra para un litro es en estado estacionario pero en este caso que se debe aplicar una agitación el líquido se podrá derramar y por tal motivo aumentamos un factor de seguridad del 15 % del altura inicial de la jarra. Se tiene un volumen total de:

Donde: V_t = volumen total, V = volumen corregido y V_r = volumen real.

Para calcular la altura de las jarras se utiliza la siguiente expresión:

Donde: A_t = altura del tanque agitador y θ_t = diámetro del tanque.

Cuando se trabaja con jarras preelaboradas es aconsejable utilizar la siguiente ecuación en la que el objetivo es encontrar la altura a la que llegará el líquido.

$$h = \frac{V_t}{\pi\left(\frac{\theta_t}{2}\right)^2} \quad (2)$$

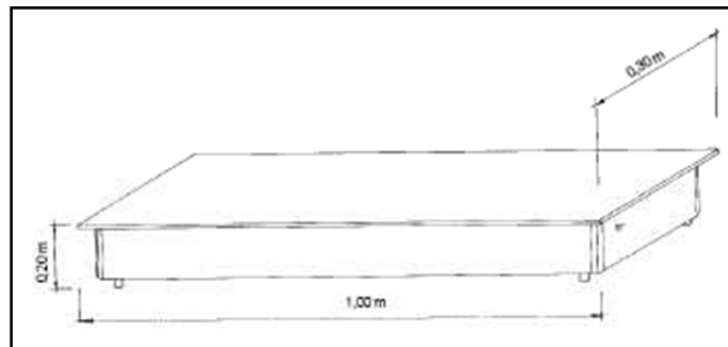
Donde: h = Altura del liquido, V_t = Volumen total y θ_t = diámetro del tanque

Iluminación

Para observar el flóculo formado en los vasos, es conveniente, aunque no esencial, una buena iluminación. Idealmente, los vasos deben estar provistos con una base blanca y una iluminación en ángulo recto a la dirección del observador; por ejemplo, arriba o abajo de los vasos.

Figura 5

Base iluminada[Martínez Delgadillo (1999)]



Se deben evitar fuentes de luz que generen mucho calor y con un efecto significativo en la coagulación y sedimentación, lo que ocasiona diferencias de temperaturas entre el agua del modelo y la realidad. Ello redundará en la obtención de resultados erróneos.

Diseño del sistema de agitación

Agitación

Es una operación mecánica que consiste en realizar movimientos violentos e irregulares en el seno de una masa fluida o que se comporte como tal para obtener una mezcla homogénea, es decir mantener la concentración constante en todas las partes de la masa. Mediante esta operación se consigue la introducción de energía en el volumen del fluido, o sea, que la energía cinética que posee el impelente se transfiere al fluido provocando su movimiento. Los impelentes utilizados con este objetivo pueden ser clasificados por el flujo que inducen en el tanque agitado como impelentes de flujo axial y de flujo radial. Entre los impelentes de flujo radial el más utilizado industrialmente es la turbina de disco con paletas planas, por lo cual, a pesar de haber sido ampliamente estudiado, continúa siendo objeto de investigación.

Los tanques agitados, por su parte, han sido utilizados históricamente en la industria alimenticia, la química y la biotecnológica, constituyendo el tipo de reactor utilizado por excelencia. Este hecho constituye la causa fundamental de que en la actualidad se continúen las investigaciones básicas sobre la hidrodinámica en este tipo de reactor.

Reseña histórica de los agitadores

El primer agitador industrial fue usado hace unos cien años en una planta de fertilizantes. Se trataba de una hélice marina. Más adelante se inventaron agitadores de forma muy diversa, con geometría escogida a menudo más por su estética que por su eficiencia.

Es solo a partir de los años 50 que se empezó a investigar las relaciones entre la herramienta de agitación y su resultado concerniente al grado de mezclado. Hoy en día se entienden las reglas fundamentales de funcionamiento y de desempeño de los agitadores industriales.

Sin embargo se siguen las investigaciones para comprender en detalles las transferencias de cantidad de movimiento, masa y calor producidas por los muy variados métodos de inducción de la agitación, a saber: rotación, vibración, bombeo, flujo restringido, chorro,

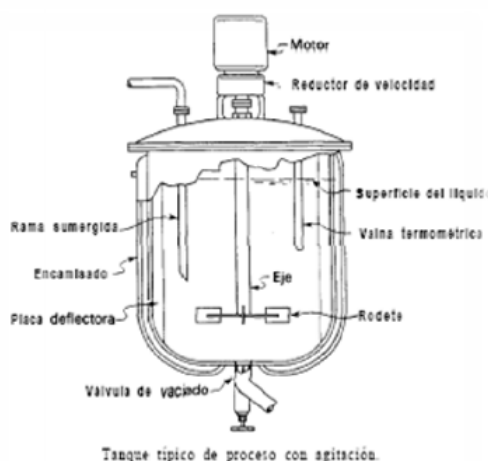
burbujeo, ultrasonido, etc. Las investigaciones se han realizado en dos direcciones principales: de un lado hacia la creación y el desarrollo de nuevos sistemas y aparatos, y del otro lado hacia la cuantificación de la calidad de la mezcla.

Equipo de agitación

Los líquidos se agitan con más frecuencia en tanques o recipientes, generalmente de forma cilíndrica y provistos de un eje vertical. La parte superior del recipiente puede estar abierta al aire o cerrada. Las proporciones del tanque varían bastante dependiendo de la naturaleza del problema de agitación.

Figura 6

Equipo de agitación [Verdugo Leal y cols. (2013)]



El fondo del tanque es redondeado y no plano, con el fin de eliminar los rincones escarpados o regiones en las que no penetrarían las corrientes de fluido. La altura del líquido es aproximadamente igual al diámetro del tanque. El rodete va instalado sobre un eje suspendido, es decir, un eje soportado en la parte superior. El eje está accionado por un motor a veces directamente conectado al eje, pero más frecuentemente acoplado al eje a través de una caja reductora de velocidad. Generalmente lleva incorporados encamisados y vainas para termómetros u otros instrumentos de medida de la temperatura. La longitud del brazo del agitador está dada por la siguiente ecuación:

$$L_b = \theta_t/2 \quad (3)$$

Donde: L_b = Longitud del brazo θ_t = Diámetro del tanque.

Dentro del sistema de agitación el rodete crea un modelo de flujo en el sistema, dando lugar a que el líquido circule a través del tanque y eventualmente retorne al rodete. No existe una relación fija para el espesor del rodete generalmente varía desde un sexto hasta un decimo de la longitud del brazo. Sin embargo la relación más empleada es la siguiente:

$$E_r = 1/10(L_b) \quad (4)$$

Donde: E_r = Espesor del rodete L_b = Longitud del brazo.

Para el diámetro del rodete se emplea la siguiente ecuación:

$$\theta_r = 2\theta_t/3 \quad \text{*** REVISAR} \quad (5)$$

Donde: θ_r = Diámetro del rodete θ_t = Diámetro del tanque

Para que exista una buena mezcla debe existir un espacio adecuado entre el fondo del tanque y el rodete para que todas las corrientes provocadas por la agitación puedan homogenizar completamente el o los líquidos involucrados en el proceso. Para ello generalmente se tiene la siguiente ecuación:

$$X = h - L_b \quad (6)$$

Donde: X = Distancia entre el fondo del tanque, la paleta h = Altura del líquido y L_b = Longitud del brazo

Para determinar el alto de la paleta se emplea a menudo la siguiente expresión:

$$A_p = 1/5L_b \quad (7)$$

Donde: A_p = Alto de la paleta L_b = Longitud del brazo

Potencia consumida en los recipientes de agitación. Un factor trascendental en el diseño de un recipiente de agitación es la potencia necesaria para mover el impulsor. Puesto

que la potencia requerida para un sistema dado no puede predecirse teóricamente, se tienen correlaciones empíricas para estimar los requerimientos de potencia.

La presencia o ausencia de turbulencia puede correlacionarse con el número de Reynolds del impulsor N_{Re} , que se define como

$$N_{RC} = \frac{\theta_t^2 * N * \rho}{\mu} \quad (8)$$

Donde: θ_t = Diámetro del tanque (m), N = Número de revoluciones por segundo, μ = Viscosidad del fluido (Pa.s) y ρ = Densidad del fluido (Kg/m^3).

El consumo de potencia se relaciona con la densidad del fluido p , su viscosidad p , la velocidad de rotación N el diámetro del impulsor D_a , por medio de gráficas de número de potencia N_p en función de N_{Re} . El número de potencia es:

$$N_p = \frac{P}{N^3 * \rho * \theta_t^5} \quad (9)$$

Donde: N_p = Numero de potencia, P = Potencia (W), N = Revoluciones por segundo, P = Densidad del fluido (Kg/m^3) θ_t = diámetro del tanque (m) Para evitar un sobrecalentamiento del motor se debe trabajar con un factor de seguridad que generalmente es decidido por el personal de diseño el factor de seguridad del 30 % indica un sistema completamente seguro, el 20 % indica un sistema medianamente seguro y el 10 % indica un sistema de protección bajo. Entonces se tiene la siguiente ecuación:

$$P_c = (f_s * P) + P \quad (10)$$

Donde: P_c = Potencia corregida y f_s = Factor de seguridad.

tipos de rodetes

Los agitadores de rodete se dividen en dos clases: los que generan corrientes paralelas al eje del rodete, y aquellos que generan corrientes en dirección tangencial o radial. Los primeros reciben el nombre de rodetes de flujo axial, y los segundos rodetes de flujo radial.

Los tres principales tipos de rodets son hélices, palas y turbinas. Otros rodets especiales resultan también útiles en situaciones especiales, pero los tres tipos principales mencionados resuelven tal vez el 95 % de todos los problemas de agitación de líquidos.

Hélice: Una hélice es un rodete con flujo axial y alta velocidad que se utiliza para líquidos de baja viscosidad. Las hélices pequeñas giran con la misma velocidad que el motor, entre 1150 y 1750 rpm; las grandes giran entre 400 y 800 rpm. Las corrientes de flujo que salen del rodete continúan a través del líquido en una dirección determinada hasta que chocan con el fondo o las paredes del tanque. La columna, altamente turbulenta, de remolinos de líquido que abandona el rodete, arrastra al moverse líquido estancado, probablemente en mayor proporción que lo haría una columna equivalente procedente de una boquilla estacionaria. Las placas de un rodete cortan o cizallan vigorosamente el líquido.

Debido a la persistencia de las corrientes de flujo, los agitadores de hélice son eficaces en tanques muy grandes. Una hélice giratoria traza una hélice en el fluido y, si no hubiese deslizamiento entre el fluido y la hélice, una revolución completa provocaría el desplazamiento longitudinal del líquido una distancia fija, dependiendo del ángulo de inclinación de las palas de la hélice. La relación entre esta distancia y el diámetro de la hélice se conoce como paso de hélice. Una hélice con un paso de 1,0 se dice que tiene paso cuadrado.

Paletas: Para los problemas más sencillos, un agitador eficaz consta de una pala plana que gira sobre un eje vertical. Son frecuentes los agitadores de dos y cuatro palas. A veces las palas están inclinadas, pero lo más frecuente es que sean verticales. Las palas giran a bajas o moderadas velocidades en el centro del tanque, impulsando el líquido radial y tangencialmente, sin que haya prácticamente movimiento vertical excepto que las placas están inclinadas.

Las corrientes que generan se desplazan hacia fuera hasta la pared del tanque y después hacia arriba o hacia abajo. En tanques profundos se instalan varias palas, unas sobre otras, en un mismo eje. En algunos diseños las placas se adaptan a la forma de las paredes del

tanque, de forma que rascan la superficie y pasan sobre ella con una muy pequeña holgura.

Una pala de este tipo recibe el nombre de agitador de áncora.

Los agitadores industriales de palas giran a velocidades comprendidas entre 20 y 150 rpm.

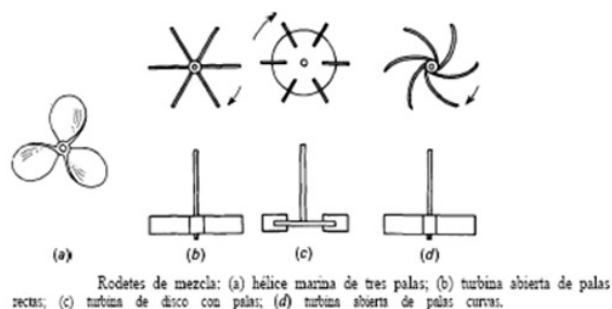
La longitud total de un rodete de palas está típicamente comprendido entre el 50 y el 80 por 100 del diámetro interior del tanque. La anchura de la pala es de un sexto a un décimo de su longitud. A velocidades muy bajas los agitadores de palas generan una agitación muy suave en tanques sin placas deflectoras, las cuales son necesarias para velocidades más elevadas, pues de lo contrario el líquido se desplaza en bloque alrededor del tanque con velocidad alta, pero con poca mezcla.

Turbinas: La mayoría de ellos recuerdan a los agitadores con numerosas palas cortas, que giran a altas velocidades sobre un eje montado centralmente en el tanque. Las placas pueden ser rectas o curvas, inclinadas o verticales. El rodete puede ser abierto, semicerrado o cerrado.

En líquidos de baja viscosidad las turbinas generan fuertes corrientes que persisten en todo el tanque, destruyendo bolsas de fluido estancado. Las corrientes principales son radiales y tangenciales. Los componentes tangenciales inducen la formación de vórtices y remolinos, que deben ser destruidos por placas deflectoras o por un anillo difusor para que la agitación sea más eficaz.

Figura 7

Tipos de rodetes [Rizo Ulacia (2012)]



Sistema de control PID

Un controlador o regulador PID es un dispositivo que permite controlar un sistema en lazo cerrado para que alcance el estado de salida deseado. El controlador PID está compuesto de tres elementos que proporcionan una acción Proporcional, Integral y Derivativa. Estas tres acciones son las que dan nombre al controlador PID.

Sintonización de un controlador PID

Acción Proporcional: Se aumenta poco a poco la acción proporcional para disminuir el error (diferencia entre el estado deseado y el estado conseguido) y para aumentar la velocidad de respuesta. Si se alcanza la respuesta deseada en velocidad y error, el PID ya está sintonizado. Si el sistema se vuelve inestable antes de conseguir la respuesta deseada, se debe aumentar la acción derivativa.

Acción Derivativa: Si el sistema es demasiado inestable, se aumentará poco a poco la constante derivativa K_d para conseguir de nuevo estabilidad en la respuesta.

Acción Integral En el caso de que el error del sistema sea mayor que el deseado, se aumentará la constante integral K_i hasta que el error se minimice con la rapidez deseada. Si el sistema se vuelve inestable antes de conseguir la respuesta deseada, se debe aumentar la acción derivativa.

Aplicaciones del control PID

El control PID se aplica a sistemas que requieran de una alta precisión, como aplicaciones de temperatura o presión, en donde la salida final del sistema debe ser lo más cercana a la salida deseada. Además, con estos controladores se logra ajustar parámetros como la velocidad de respuesta y el sobrepaso, vitales en sistemas de posicionamiento.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un equipo de prueba de jarras con velocidad y tiempo de funcionamiento programable para la tratabilidad de aguas.

Objetivos específicos

- Diseñar los sistemas mecánicos, eléctrico y de control del equipo de prueba de jarras.
- Construir el sistema mecánico y eléctrico del equipo de pruebas de jarras.
- Implementar un algoritmo que permita modificar, monitorizar y controlar las velocidades de los agitadores del equipo de jarras
- Realizar pruebas del funcionamiento del equipo.

Metodología

El diseño e implementación de un equipo de pruebas de jarras para la tratabilidad de aguas residuales, pretende realizar un estudio de carácter educativo. Este proceso debe cumplir con los objetivos anteriormente propuestos, a través del desarrollo de la siguiente metodología:

- **Revisión bibliográfica:** Se recopilará información de los temas abarcados en el marco, para así mismo profundizar en los conocimientos de proyectos similares, a través de la recopilación de información de componentes que componen estos, investigaciones realizadas a nivel nacional e internacional y artículos de revistas científicas entre otros.
- **Diseño de los sistemas:** Con base a la información recopilada se efectuará el diseño con los materiales y componentes que conforman el equipo de jarras, con sus respectivas medidas para el desarrollo del prototipo y anticipar errores que tengamos más adelante, tratando de realizarlo la mejor manera posible.
- **Construcción:** Se procederá a trabajar en conjunto en base con el diseño realizado para su construcción, tendrá un sistema amigable con el usuario, donde el usuario podrá visualizar y manipular los RPM para alternar sus velocidades de mezclado.
- **Implementación de los algoritmos:** Tiene como función adecuar el algoritmo de control que permita mantener de forma adecuada las velocidades programadas de los agitadores del equipo de jarras.
- **Pruebas finales:** Se procederá a experimentar la funcionalidad del equipo, realizando el debido test de jarras en compañía de personal experto en el tema como lo es nuestro Codirector para validar que el equipo cumple la función de mejorar la calidad del agua.

- Observaciones y conclusiones: Se comparara la calidad del agua optenida con la calidad de agua de otro equipo existente ya certificado y se sacara un porcentaje de error el cual concluirá la funcionalidad efectiva de nuestro equipo.

Presupuesto

Durante el desarrollo de esta propuesta de trabajo de investigación, principalmente se contará con:

- Recursos humanos: Es el recurso de mayor importancia para la realización del proyecto, pues se requiere personal especializados en el tema.
- Equipos e insumos: Se contarán con equipos disponibles de la Corporación Universitaria del Huila. Los cuales lo conforman: computadores, software de SolidWorks, motores, fuentes de alimentación DC, impresoras 3D, entre otros.
- Infraestructura: Se tendrá la infraestructura de los laboratorios de la Corporación Universitaria del Huila, junto con el espacio de mi sala de la casa cuenta, En dichos espacios se tendrá gran parte de los equipos e insumos que se necesitan.

A continuación, se relaciona los costos de los recursos necesarios para ejecutar el proyecto (ver cuadro 1).

Cuadro 1

Presupuesto del proyecto.

DESCRIPCION DEL RECURSO	VALORES		SUBTOTAL	
	UND	VALOR UNITARIO (pesos)	CANTIDAD	VALOR (pesos)
RECURSOS HUMANOS				
Jorge Luis Aroca Trujillo	Hora	80.000,00	20	1.600.000,00
Alvaro Felipe Escobar Patiño	Hora	5.000,00	300	1.500.000,00
Jamer Oswaldo Chala Ramires	Hora	5.000,00	300	1.500.000,00
MAQUINARIA Y EQUIPOS				
Fuente 12v 10 A	Unidad	52.122,00	1	52.122,00
Motor Nema 17 5.6kg/cm2	Unidad	66.600,00	2	133.200,00
Dirvers 4 A	Unidad	48.790,00	2	97.580,00
LCD 20x4	Unidad	25.585,00	1	25.585,00
Teclado matricial	Unidad	3.570,00	1	3.570,00
PIC16F877A integrado	Unidad	29.393,00	1	29.393,00
Chumacera KFL08 8mm	Unidad	6.783,00	8	54.264,00
Soporte SHF8 8mm	Unidad	7.021,00	8	56.168,00
Rodamientos LMF8 8mm	Unidad	7.639,00	4	30.556,00
Rosca T8 para varilla	Unidad	4.760,00	1	4.760,00
Polea 2GT 8mm	Unidad	5.950,00	5	29.750,00
Correa 2GT 6mm alto x 400mm de largo	Unidad	4.165,00	4	16.660,00
Varilla lisa 8mm x 1 m	Unidad	26.180,00	4	104.720,00
Puente H L298N	Unidad	10.353,00	1	10.353,00
Acople flexible de 6mm a 8mm	Unidad	5.355,00	1	5.355,00
SOFTWARE				
SolidWorks	Hora	8.000,00	80	640.000,00
OTROS				
Papelería e insumos	Unidad	80.000,00	1	80.000,00
Estructura	Unidad	400.000,00	1	400.000,00
			TOTAL	6.374.036,00

Cronograma

ACTIVIDADES	2022																			
	Mes 1.					Mes 2.					Mes 3.					Mes 4.				
DISEÑO																				
BASES TEÓRICAS																				
Tratamientos de aguas residuales																				
Mecánica del proceso																				
Sistema de agitación																				
EQUIPO DE JARRAS																				
Revisión del Hardware																				
Revisión de componentes																				
Verificación del funcionamiento																				
SOFTWARE																				
Diseño de algoritmos de control																				
Diseño mecánico																				
IMPLEMENTACIÓN																				
BASES TEÓRICAS																				
Identificación de parámetros del diseño																				
HARDWARE																				
Construcción del prototipo																				
SOFTWARE																				
Implementación de los algoritmos de control																				
Verificación de las RPM																				
Ajuste de los algoritmos de control																				
Pruebas finales																				
DOCUMENTACIÓN																				
Preparación del documento final																				

Bibliografía

- Anaissi, F. J., Villalba, J. C., Fujiwara, S. T., Cótica, L. F., Souza, C. R. L. d., y Zamora-Peralta, P. (2009). Caracterização e propriedades do material coloidal nanoestruturado β -feooH/bentonita. *Química Nova*, 32, 2006–2010.
- Bautista Arias, S. P., y Sánchez Montaluisa, B. S. (2014). *Aplicación de prueba de jarras en las aguas del canal latacunga-salcedo-ambato, a fin de disminuir la turbidez mediante floculantes en el periodo 2013* (B.S. thesis). LATACUNGA/UTC/2014.
- Guzmán, L., Villabona, Á., Tejada, C., y García, R. (2013). Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 16(1), 253–262.
- LÍQUIDO-GAS, A. D. S. (2005). Existen muchos casos de agitación de sistemas bifásicos líquido. *Transporte de Momentum Y Calor. Teoría Y Aplicaciones a la Ingeniería de Proceso.*, 6, 322.
- Martínez Delgadillo, S. A. (1999). *Parámetros de diseños de sistemas de tratamiento de aguas residuales: métodos experimentales*. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.
- Martos-López, Á. (2016). La importancia del agua para nuestro planeta.
- Rizo Ulacia, Y. (2012). *Modelo matemático del proceso de recirculación de residuales a flotador en el tratamiento de aguas residuales* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Suárez Oquendo, V. E., y Trujillo Villa, D. F. (2011). *Diseño y construcción de un equipo de prueba de jarras para la tratabilidad de aguas residuales* (B.S. thesis).
- Verdugo Leal, R. H., y cols. (2013). Diseño y cálculo de un agitador de fluidos.