



Descripción de recolector de lodos en un tanque sedimentador para el tratamiento de agua potable

Description of sludge collector in a sedimentation tank for drinking water treatment

Jorge Eduardo Campos García, Renato González Bernal*, Juan José Piña Castillo, Jesús Cirilo Trujillo Jiménez, Víctor Daniel Jiménez Macedo

Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Santiago Tapia 403, Morelia, 58000. México.

Historial

Manuscrito recibido: 22 de agosto de 2024

Manuscrito aceptado: 31 de octubre de 2024

Manuscrito publicado: diciembre 2024

*Autor para correspondencia

Renato González Bernal

E-mail: regonzalez@umich.mx.

Resumen

El presente trabajo se realizó para la planta potabilizadora de agua de Vista Bella en Morelia, Michoacán, alimentada con agua proveniente de la presa de Cointzio, la cual cada vez trae más residuos sólidos. La limpieza de los tanques sedimentadores se hace de forma manual, cada 3 o 4 meses dependiendo de la acumulación de lodos, lo que conlleva a un riesgo del personal operario. El objetivo es transformar la forma en que se recolectan los lodos en el tanque sedimentador, para lo cual se estudiaron las diversas formas existentes de extracción de lodos y se eligió un sistema de purga utilizando el diferencial de presión hidrostática, con lo que se espera un ahorro económico, energético y de recurso natural. El extractor de lodos propuesto permitiría alargar el periodo de lavado de los tanques, lo que contribuirá en un menor desperdicio del recurso hidráulico y mantendrá a los operarios sin riesgos. Este sistema automatizado extraerá los lodos de forma más eficiente, modificando la purga que se hace de forma manual y evitará la acumulación de los lodos en el tanque, manteniéndolos más limpios.

Palabras clave: Tanque de sedimentación, purga de lodos, presión hidrostática, planta potabilizadora.

Introducción

El concepto de tanque de sedimentación ideal fue desarrollado por Hazen (Hazen, 1904), y es la base para llegar a las relaciones utilizadas en el diseño de tanques de sedimentación. Hazen introdujo una visión idealizada para describir el flujo y el proceso de sedimentación de soluciones diluidas en sedimentadores

Abstract

This work was carried out for the Vista Bella water treatment plant in Morelia, Michoacán, fed with water from the Cointzio dam, which brings more and more solid waste. The cleaning of the sedimentation tanks is done manually, every 3 or 4 months depending on the accumulation of sludge, which leads to a risk for the operating personnel. The objective is to transform the way in which sludge is collected in the sedimentation tank, for which the various existing forms of sludge extraction were studied and a purge system was chosen using the hydrostatic pressure differential, which is expected to save economic, energy and natural resources. The proposed sludge extractor would extend the washing period of the tanks, which will contribute to less waste of the hydraulic resource and keep operators without risks. This automated system will extract the sludge more efficiently, modifying the purge.

Keywords: Sedimentation tank, sludge purge, hydrostatic pressure, water treatment plant.

rectangulares, donde exponía un elemento con un campo de velocidades uniformes, es decir, un flujo pistón, con partículas de sedimentación vertical, sin turbulencia, y con una independencia entre el flujo y la sedimentación y sin influencias de la densidad.

En la descripción del flujo de Hazen, se introdujo además el concepto de carga superficial, exponiendo que

todas las partículas con una velocidad de sedimentación mayor a la carga hidráulica superficial pueden sedimentar hasta el fondo antes de llegar al final de la pared del sedimentador, refiriéndose fundamentalmente al caso de decantadores rectangulares diseñados como largos canales donde las partículas sedimentan mientras se dirigen hacia la salida del canal.

El término sedimentación comprende un grupo de mecanismos de asentamiento de acuerdo al tipo y concentración de sólidos o partículas suspendidas (Arboleda, 2000). En sedimentadores que no están diseñados para procesos anaerobios, la remoción regular del lodo es necesaria para prevenir condiciones sépticas, así como la acumulación y el desprendimiento de gas que pueda obstaculizar el proceso de sedimentación al volver a suspender parte de los sólidos asentados (Tilley *et al.*, 2014). El lodo transportado a la superficie por las burbujas de gas es difícil de remover y puede pasar a la siguiente etapa de tratamiento (Tilley *et al.*, 2014). Dependiendo del diseño del sedimentador, el desenlodado puede realizarse con bomba de mano, suspensión, bomba de vacío o por gravedad, utilizando una salida baja. Si el fondo del tanque está lo suficientemente inclinado, se facilita la remoción de lodo (Tilley *et al.*, 2014).

Los sedimentadores primarios grandes a menudo están equipados con colectores mecánicos que raspan continuamente los sólidos asentados hacia una tolva de lodo en la base del tanque, desde donde se bombea a las instalaciones de tratamiento de lodos (tanques de espesamiento o digestores) (Tilley *et al.*, 2014; CONAGUA 2019). La eliminación frecuente de espuma y su adecuado tratamiento/ disposición final, ya sea con el lodo o por separado, también es muy importante; puede realizarse manualmente o mediante equipos mecánicos de recolección para su tratamiento y disposición adecuada (Tilley *et al.*, 2014; CONAGUA 2019). La colocación de placas o tabiques deflectores, mecanismos distribuidores de la alimentación y mamparas de alimentación, que dispersan la velocidad, pueden dar lugar a una disminución de la canalización y aumento de la eficiencia (Weber, 1972)

Un sedimentador es un tanque que está diseñado para eliminar sólidos suspendidos por sedimentación (**Figura 1a**). También se le llama decantador, tanque de asentamiento o tanque de sedimentación. La baja velocidad del flujo en un sedimentador permite que las partículas sedimentables se desplacen al fondo del tanque, mientras los componentes que pesan menos que el agua flotan hacia la superficie. También pueden servir para el procesamiento de lodos en su forma de espesadores

o clarificación secundaria en el tratamiento de lodos activados. Los tanques de sedimentación primarios son aquellos que reciben aguas residuales crudas, antes del tratamiento biológico, los cuales permiten reducir de manera significativa los sólidos suspendidos (de 50 a 70%) y la materia orgánica (de 20 a 40% de DBO, Demanda Biológica de Oxígeno), garantizando que estos componentes no afecten negativamente los procesos de tratamiento posteriores (Latargere, 2020).

La sedimentación puede presentarse de formas diversas, dependiendo del tipo de partículas y su concentración, el tipo de sedimentador y la zona del tanque donde ocurre este fenómeno, entre otras variables. Los desarenadores se utilizan para remover partículas mayores de 0.2 mm, estas sedimentan de forma independiente sin interacciones entre ellas ni con el fluido que las contiene, las características de los sólidos son partículas discretas y aisladas en solución.

En el caso de los sedimentadores de agua potable con coagulación-floculación previas y decantadores de aguas residuales, a las partículas no disueltas se les agrega un coagulante para que cuando llegue el flujo al tanque sedimentador ya estén aglomeradas, se les llama flóculos o flocs de tamaño adecuado, una vez en este tanque cambia el régimen de flujo de turbulento a flujo laminar, de esta manera los flocs comienzan a descender al fondo del tanque. Este tipo de sedimentador es el que se utiliza en la planta de vista bella y es en el que se enfoca nuestro estudio. Para los sedimentadores y decantadores de flujo ascendente, la mezcla de agua entra por la parte inferior del sedimentador y este asciende a través de unas placas inclinadas que subdividen el espacio en compartimientos, en el que un flujo laminar de partículas no disueltas cae por su propio peso a través de las placas inclinadas y en el fondo de estos tanques se recolectan los lodos formados (Rincón *et al.*, 2014). La compactación de lodos en sedimentadores y en unidades de espesamiento de aguas residuales permite la formación de una masa compactada de partículas en el fondo de las unidades. Las características de los sólidos es que son suspensiones de alta concentración (Lozano *et al.*, 2020).

Los colectores de lodos son cada vez más utilizados en las plantas de tratamientos de agua, ya que representan un medio efectivo de extraer los lodos sin tener que detener la actividad de la planta. Una forma de clasificarlos es por el número de ejes, como los colectores de cuatro ejes, que remueven el lodo en el fondo y en la superficie. Los colectores llamados de tres ejes solo recolectan el lodo sedimentado en el fondo

del tanque. Los recolectores cruzados son utilizados en sedimentadores de mayor tamaño y estos raspan el lodo del fondo del tanque y lo llevan a un depósito. Los recolectores llamados duales recolectan el lodo del fondo a través de un tubo que aspira el lodo y lo lleva a través de una manguera por diferencial de presión a un tanque de lodos (Brentwood, 2022). En este estudio, se realizó la investigación del tanque sedimentador de la planta de vista bella, cuya limpieza es de forma manual e implica la detención de su la operación y el vaciado del tanque.

Metodología

En una primera etapa, se tomaron datos como la dimensión del tanque y el caudal de trabajo. Al mismo tiempo, se realizaron pruebas de laboratorio para conocer la cantidad de solidos suspendidos para determinar el tipo de recolector de lodos más adecuado. Ya que se seleccionó el tipo de recolector de lodos, se procedió a modelarlo, seleccionando resistencia de los materiales tanto al esfuerzo como a la corrosión debido a que este sistema se encontrará sumergido en agua con solidos

suspendidos. Entre los criterios básicos de diseño fue utilizar la especificación AISC, que limita la deflexión causada por una carga a $1/360$ del tramo de la viga (Koo, 1967) y un factor mínimo de seguridad de 12 para cargas dinámicas del tubo de aspiración. También se utilizó la norma ANSI A17.1.1978 para considerar el factor de seguridad del cable de arrastre del carro de aspiración, el cual tendrá una velocidad máxima de desplazamiento de 0.13m/s para que los flocs formados no se rompan (Lozano *et al.*, 2020). Finalmente, se seleccionó el motor que dará el impulso necesario para desplazar el carro aspirador.

Resultados y discusión

La planta consta de 4 trenes de procesos que utilizan el tratamiento de agua superficial convencional. Los procesos que se llevan a cabo, son mezcla rápida o coagulación, mezcla lenta o floculación, sedimentación, filtración y desinfección, los cuales se muestran en la **Figura 1b**. El agua cruda proviene de la Presa de Cointzio y su caudal total esta entre 600 y 640 l/s. El agua tratada tiene alta turbidez, color y olor intensos.

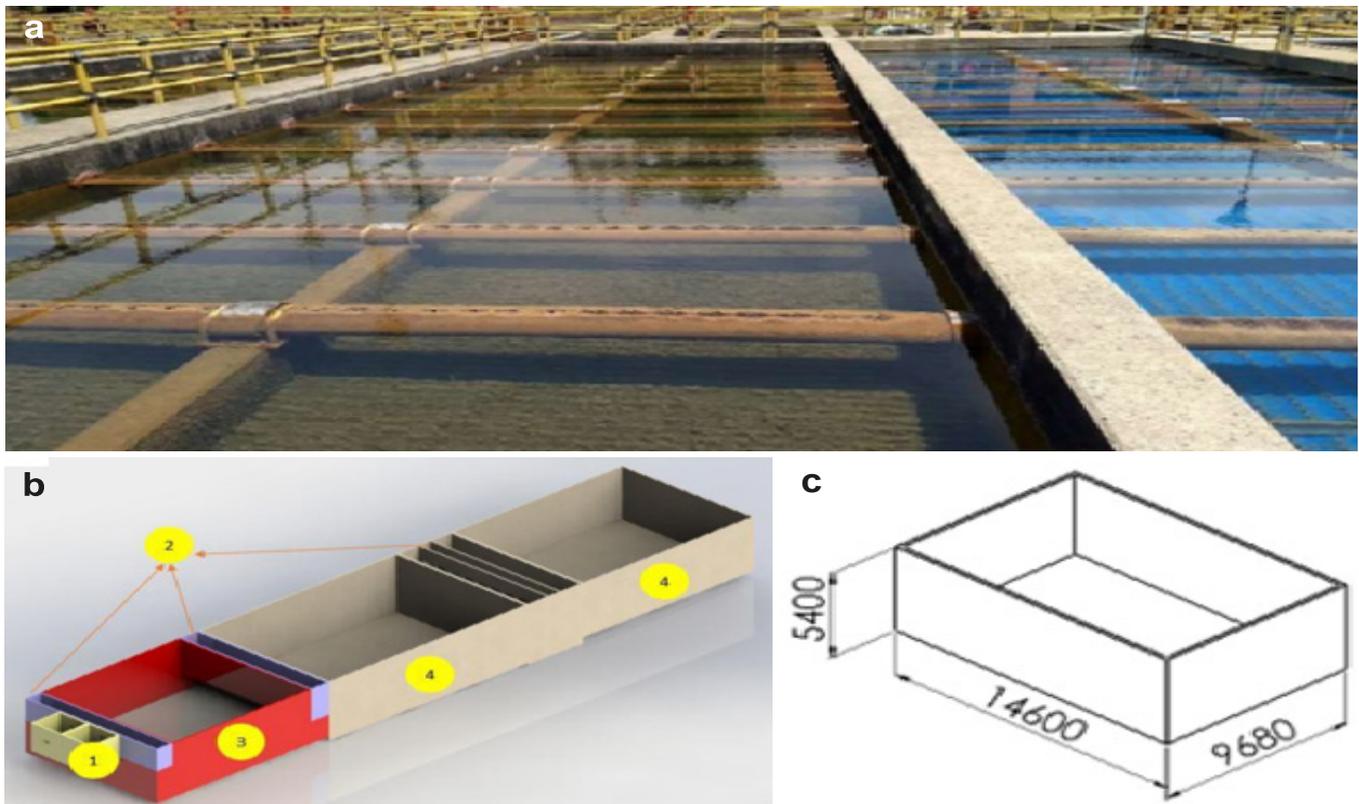


Figura 1. Tratamiento de agua potable, **a)** tanque sedimentador rectangular **b)** tren de procesos de tratamiento de agua y **c)** dimensiones del tanque sedimentador de la planta de Vista Bella.

Las dimensiones del tanque sedimentador se muestran en la **Figura 1c**.

La planta tiene su propio laboratorio, en este se realizó la prueba de jarras que es el método más adecuado para determinar algunos parámetros como la turbiedad, color y cantidad de sólidos suspendidos que se requieren para la selección del recolector de lodos (CONAGUA, 2022).

En las pruebas, se pudo comprobar la cantidad de sólidos suspendidos dentro del agua, durante el mes de julio, cuando se genera la cantidad mayor de agentes contaminantes, por ser época de lluvias. Cabe resaltar, que dicha cantidad varía dependiendo de la época y estación del año. A partir de esto, los resultados de la prueba de jarras se muestran en la **Tabla 1**.

El resultado que nos arroja la prueba A de la jarra 1 fue de 3 ml de lodo por cada litro de agua cruda, en la prueba B, se obtuvo 5 ml de lodo por cada litro de agua cruda. A partir de estos parámetros, se determina si el agua tratada es adecuada para consumo humano, dichos parámetros son entre 0 y 9 ml de lodo por cada litro de agua, cumpliendo con los parámetros nacionales de calidad NOM 127 de la secretaria de salud.

Recomendación del tipo de colector

Para este proyecto, se recomienda utilizar un recolector dual, debido al tamaño y forma del tanque sedimentador, el cual tiene el fondo plano, y la cantidad de lodo sedimentado, ya que las impurezas solo representan el 8% por litro de agua tratada. Este tipo de recolector esta recomendado para impurezas de hasta 10% (Brentwood, 2022). Para cada tanque sedimentador, se propone dos colectores que trabajen en paralelo los cuales tendrían una separación entre ellos y las paredes de aproximadamente 50 centímetros. El recolector solo ocupa la energía eléctrica para que el carro succionador haga el recorrido por el fondo del tanque de lado a lado, la velocidad del carrito debe ser baja para que no perturbe el flujo en el tanque y rompa los flocs formados. La succión del lodo sedimentado se hace debido a la diferencia de

presión que existe entre el fondo, la superficie libre y la descarga, la cual se encontraría debajo de la superficie libre del tanque, este se conecta a una tubería en donde, posteriormente, se le dará tratamiento a la mezcla de lodo.

Diseño y modelado de los componentes

A continuación, se muestra el diseño y modelado de los componentes principales de carrito aspirador, para el modelado se utilizó el software SolidWorks®, este programa fue de gran ayuda para modelar cada uno de los componentes y después realizar el ensamblaje de ellos. El primer componente que se diseñó fue el tubo de aspiración, se tomó en cuenta la manguera de descarga, la corrosión debido al ambiente y la deflexión que podría sufrir debido al su propio peso y las cargas a las cuales estaría sometido. Se decidió utilizar una manguera comercial, ya que es más económica y soporta muy bien el ambiente corrosivo existente, la cual tendría un diámetro interno de 4 pulgadas, por lo que el tubo tiene el mismo diámetro. En el caso del ambiente, sumergido en agua con altos índices de turbiedad y agregados de agentes químicos, se decidió utilizar acero inoxidable 316, el cual tiene como característica una alta resistencia por su contenido de molibdeno. De acuerdo a las cargas sometidas y su propio peso, se realizó el análisis con un tubo comercial de acero inoxidable 316 cédula 40, el cual nos arrojó resultados adecuados de acuerdo a los criterios de diseño utilizados. Las propiedades de este material se muestran en la **Tabla 2**.

A este tubo se le realizarán perforaciones de 1 pulgada de diámetro, cada 188 mm de longitud, que tendrán la función de aspirar el lodo del fondo del tanque. El modelado que se realizó se muestra en la **Figura 2a**, en el que se puede apreciar la brida ANSI B 16.5 que se conecta con la manguera de desagüe de lodo. Para el análisis se consideró únicamente la mitad, ya que va a estar soportado por el centro del tubo y la otra mitad tendría las mismas características, obteniendo resultados comparables de análisis.

Con ayuda del software SkyCiv® se obtuvieron las reacciones, el momento máximo y la deflexión, los resultados se muestran en la **Tabla 3**. Además, se encontró el esfuerzo máximo (**Tabla 3**) con la siguiente ecuación:

Tabla 1. Resultados de sólidos suspendidos en el agua.

Jarra 1		Jarra 2		Jarra 3		Jarra 4	
A	3 ml/l	A	3 ml/l	A	4 ml/l	A	3.5 ml/l
B	5 ml/l	B	5 ml/l	B	5.5 ml/l	B	5.5 ml/l
Suma	8 ml/l	Suma	8 ml/l	Suma	9 ml/l	Suma	9 ml/l

Tabla 2. Tubo sin costura de acero inoxidable 316.

D. nominal (pulg)	D. ext. (mm)	Espesor (mm)	Resistencia a la tracción, (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	M. de elasticidad (GPa)	Porcentaje de Mo (%)
4	114.30	6.02	515	40	193	2

Tabla 3. Reacciones, el momento máximo, la deflexión y otras variables.

Reacciones (kN)	Momento máximo (kN m)	Deflexión (mm)	Relación de extensión de deflexión	Esfuerzo	Factor de diseño
10.31	10.31	1.104	1/905	12.25 MPa	42

$$\sigma = \frac{M}{S} = \frac{1031000}{841632} = 12.25 \text{ Mpa} \quad (1)$$

Donde σ es el esfuerzo M es el momento máximo y S es el módulo de la sección.

También se obtuvo el factor de diseño, como se muestra en la **Tabla 3**.

La segunda pieza que se diseñó fue el chasis del carro de aspirador, esta tiene la forma de un canal en C, aquí van ensamblados y/o soldados la mayoría de los componentes, el material es de acero inoxidable 316. A través de esta, se apoya el tubo de aspiración y están conecta-

das las ruedas que transmiten el movimiento lineal sobre un riel. En los extremos se conecta el cable de acero, el cual mueve todo el carro (**Figura 2b**).

El tercer elemento en diseñarse fue la rueda, esta nos sirve para poder dar movilidad al sistema y así recorrer el fondo del tanque sedimentador. Este componente será fabricado con Nylamid Tipo M, un material anticorrosivo, con coeficientes de fricción bajos, y una resistencia a la compresión de 1035 kg/mm². A cada llanta se acoplan dos rodamientos rígidos de bolas de acero inoxidable, cada uno soporta una carga de 8.32 kN, estos transmiten el peso a la llanta y están conectados con el eje (**Figura**

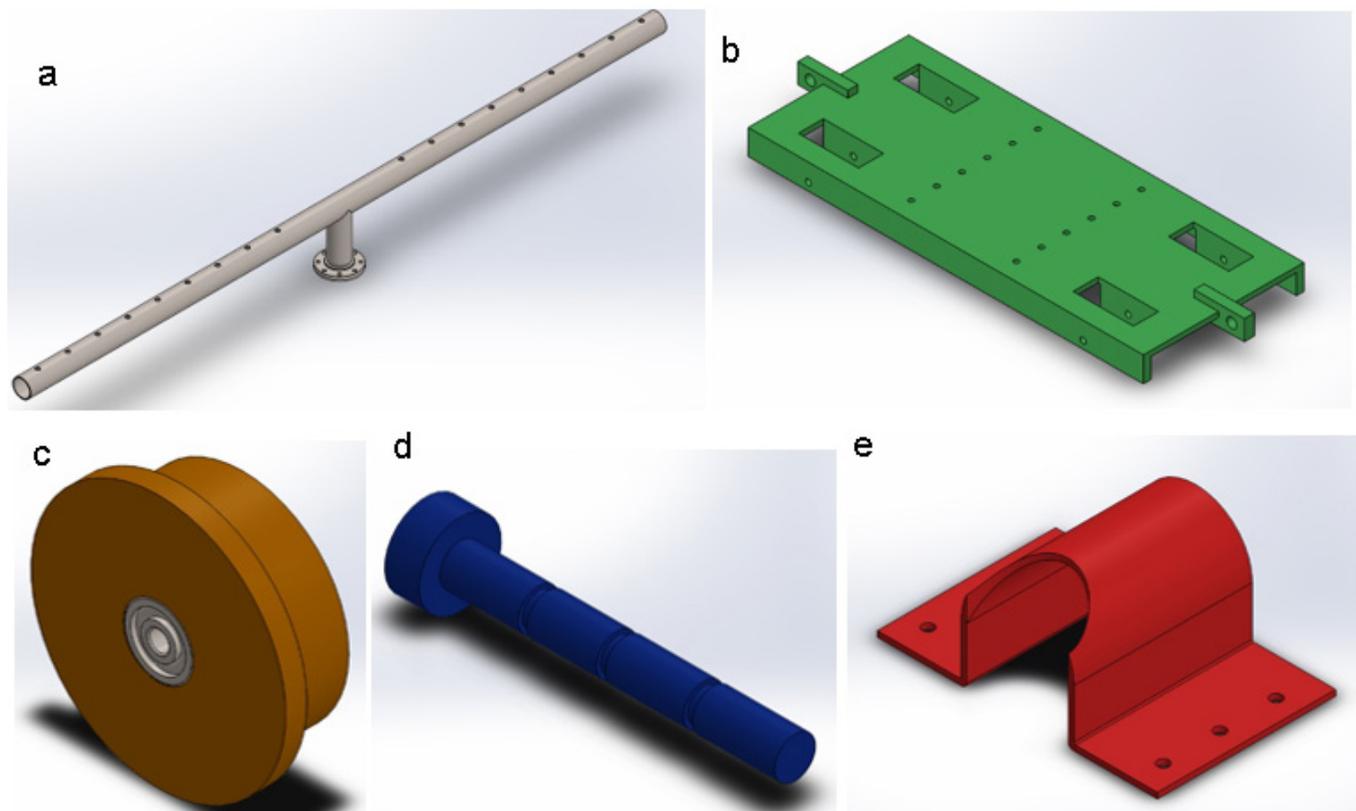


Figura 2. Elementos principales del carro succionador a) tubo de aspiración, b) chasis, c) rueda con rodamiento, d) eje de las llantas y e) chumacera de fijación

2c).

Las ruedas se conectan al chasis mediante un eje y este transmite el peso del carro a las ruedas, está fabricado de acero inoxidable 316, y tiene pequeñas ranuras donde se acoplan los seguros truack para que no exista movimiento axial ni de las ruedas ni del chasis (**Figura 2d**).

Para sujetar el chasis al tubo de aspiración, se diseñó un tipo de chumacera, que se conecta al chasis por medio de 12 pernos de 0.5 in, esta dará rigidez al tubo para que quede fijo durante su movimiento longitudinal, (**Figura 2e**).

El desplazamiento del carro succionador se hará mediante un cable de acero inoxidable 304 para lo cual se determinó la fuerza total que consiste en la fuerza de arrastre del agua más la fuerza de fricción entre las llantas y el riel. A continuación, se muestra el análisis de la determinación de la fuerza de arrastre del tubo de aspiración. Para determinar el coeficiente de arrastre es necesario determinar el número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (2)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A \quad (3)$$

Datos:

$$V=0.13 \text{ m/s}, \mu=1.138 \times 10^{-3}, D=0.1016 \text{ m}, \rho=1000 \text{ kg/m}^3$$

Donde C_D es el coeficiente de arrastre, V velocidad de flujo, ρ densidad, A área, D diámetro del tubo y μ es la viscosidad dinámica obteniendo como resultados:

$$Re=11606, C_D=1.2, A=LD=0.4064\text{m}^2, F_D=4.12N$$

Para la fuerza de fricción el peso total del carro se determinó en SolidWorks dando como resultado 1433N, el coeficiente de fricción estático del Nylamid M es de 0.4.

$$F_S = \mu_S F_N = 0.4 * 1433 = 573.22N \quad (4)$$

$$F_D + F_S = 577.34N \quad (5)$$

$$F_{max} = FSF_{perm} = 4041.4N \quad (6)$$

El factor de seguridad utilizado para el cable es de 7.0 que es el de malacates eléctricos.

El esfuerzo permisible es de 1.569 GPa. El diámetro mínimo requerido del cable es:

$$d = \sqrt{\frac{4F_{max}}{\pi\rho_{perm}}} = 1.81mm \quad (7)$$

El diámetro mínimo sugerido debido a la corrosión que no se considera en el factor de seguridad y el acoplamiento con las poleas es de 6.35 mm.

Finalmente, se seleccionó el motorreductor para desplazar el carro succionador, este se conectará por medio del cable de acero, para lo cual se sugiere el motorreductor de corona sinfin, relación 50:1 de 1.50 HP trifásico, con un torque aproximado de 209.9 Nm que es suficiente para desplazar el carro aspirador (soluciones integrales, 2014).

El modelado de ensamblaje proporcionó una guía clara sobre cómo se deben unir las piezas, ayuda a ver que el sistema mecánico se pueda ensamblar correctamente. En la **Figura 3**, se muestra el ensamblaje final del carrito. Al momento de que se elija activar el mecanismo, el motor hará transportar un cable de acero que se conecta al chasis y este comenzará a deslizarse linealmente, así todo el sistema comenzará a hacer el recorrido y aspirar el lodo. El sistema se detendrá hasta que llegue al final del recorrido o hasta que el operario le dé la indicación.

Conclusiones

Este proyecto tuvo como finalidad el sustituir la forma de la limpieza del tanque sedimentador de la planta de Vista Bella que actualmente se hace de forma manual. Se propone que se modifique la recolección de lodos por un medio mecánico y se pueda limpiar diariamente de forma uniforme, sin poner en riesgo a los operarios y alargando los tiempos de vaciado del tanque, lo que contribuiría en un mayor ahorro de agua. Los materiales se eligieron de forma que resistieran la corrosión del ambiente en el que estarán en operación, ya que es muy agresivo por que están sumergidos en agua tratada, el acero inoxidable

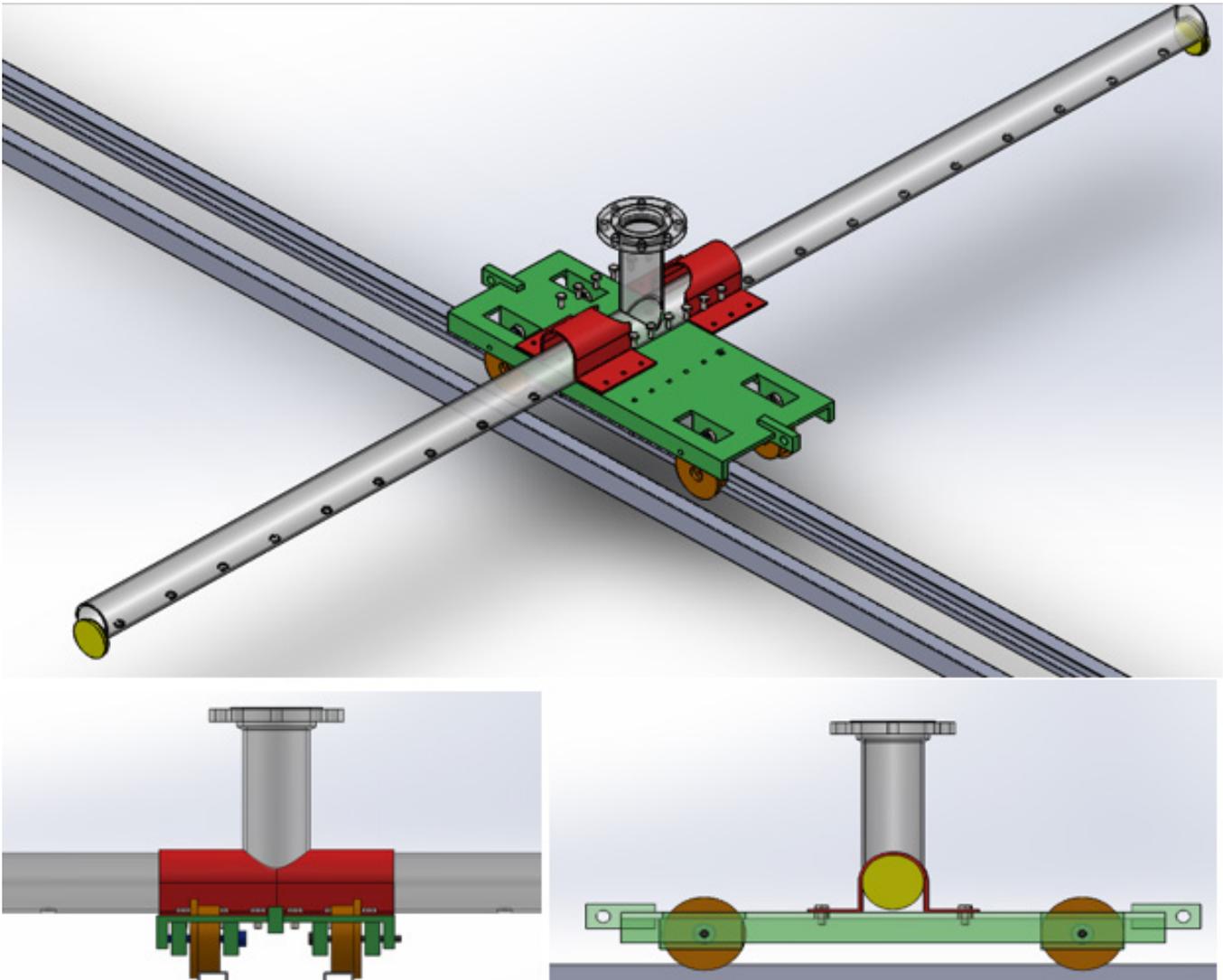


Figura 3. Vista del ensamble del carrito aspirador.

316 y el Nylamid M son suficientes para este ambiente, además en el cálculo de esfuerzos se puede observar que el factor de seguridad de los componentes críticos es adecuado para realizar la operación de aspirado de los sedimentos. De acuerdo a lo anterior, concluimos que el diseño del proyecto es viable para que se construya y se ponga en operación.

Referencias

Rincón A, Herrera OF (2014). Esquema para el dimensionamiento de unidades de sedimentación de alta tasa de flujo ascendente. *Entre Ciencia e Ingeniería* 8(16):29-40.

Arboleda-Valencia J (2000). Teoría y práctica de la purificación del agua. Bogotá: Mc Graw Hill.

Brentwood (2023). Sistemas de Recolección. <https://es.brentwoodindustries.com/productos/clarificacion/recolectores-de-lodo/sistemas-de-recoleccion/> [consultado el 12 de agosto de 2023].

Comisión Nacional del Agua (2019). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua (2023). Indicadores de la calidad del agua superficial y subterránea. Indicadores de Calidad del Agua. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/925192/Generalidades_Indicadores_de_calidad_del_agua.pdf [consultado el 21 de agosto de 2023].

Tilley EA, Ulrich L, Luthi C, Reymond P (2014). Compendium of sanitation systems and technologies. Dübendorf, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and technology (Eawag).

Hazen A (1904). Closure of on sedimentation. *Transactions of the American Society of Civil Engineers (ASCE)* 2:87-88.

Koo B (1967). «Procedimiento simplificado para determinar la deflexión máxima de una viga», *Engineering Journal. American Institute of Steel Construction* 4:123-125

Latargere J (2020). Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento. SSWM <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/tratamiento-semi-centralizado/sedimentador>

Lozano-Rivas WA (2015). Potabilización del agua: Principios de diseño, control de procesos y laboratorio. Universidad Piloto de Colombia.

Soluciones Industriales (2017). Motorreductor Corona Sinfin T-75 rel. 50:1 de 1.50 HP Trifásico Soluciones Industriales. <https://motorreductores.mx/tienda/motorreductor-corona-sinfin-t-75-rel-50-1-de-1-50-hp-trifasico/>

Weber WJ (1972). *Physicochemical processes for water quality control*, ed John Wiley.