



Diseño, construcción y evaluación de un hidrociclón para la remoción de arenas residuales en el desarenador en la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totora”- Ayacucho.

Design, construction and evaluation of a hydrocyclone for the removal of residual sand in the sand trap at the “La Totora” wastewater treatment plant - Ayacucho.



[Hualpa-Vargas, Herlis Sergio](#)¹

¹Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú.

Recibido: 04 May. 2024 | **Aceptado:** 5 Jun. 2024 | **Publicado:** 13 Ago. 2024

Autor de correspondencia*: herlissergio1993@gmail.com

Cómo citar este artículo: Hualpa-Vargas, H.S.(2024). Diseño, construcción y evaluación de un hidrociclón para la remoción de arenas residuales en el desarenador en la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totora” – Ayacucho. Revista Científica Aypate

RESUMEN

La investigación se enmarca en el estudio de “Construcción y evaluación de un hidrociclón para la remoción de arenas residuales en el desarenador en la PTAR “La Totora”, para determinar los parámetros de operación del hidrociclón y el grado de remoción de las arenas provenientes de la unidad de desarenador. Los parámetros evaluados de la operación del canal del desarenador fueron los siguientes: Longitud de canal: 30 m, ancho del canal: 1,20 m, altura del canal: 2,50 m, altura de trabajo del canal 1,15 m, caudal máximo: 0,650 m³/s, concentración de ingreso de arena 0,12166 kg/m³ y concentración de salida de arena 0,07746 kg/m³. La caracterización de la arena residual acumulada en la unidad de desarenador fue analizada dando los siguientes resultados: Contenido de materia orgánica 10,7% que está impregnada a la arena, gravedad específica 2,6208, densidad aparente 11 836 kg/m³, humedad 82,87%.

Palabras clave: Hidrociclón, Arena residual, Eficiencia.

ABSTRACT

The research is part of the study of “Construction and evaluation of a hydrocyclone for the removal of residual sand in the sand trap at the “La Totora” WWTP, to determine the operating parameters of the hydrocyclone and the degree of removal of sand from the desander unit. The evaluated parameters of the sand trap channel operation were the following: Channel length: 30 m, channel width: 1.20 m, channel height: 2.50 m, channel working height 1.15 m, flow rate maximum: 0.650 m³/s, sand input concentration 0.12166 kg/m³ and sand output concentration 0.07746 kg/m³. The characterization of the residual sand accumulated in the sand trap unit was analyzed giving the following results: Organic matter content 10.7% that is impregnated into the sand, specific gravity 2.6208, apparent density 11,836 kg/m³, humidity 82.87%.

Keywords: Hydrocyclone, Residual sand, Efficiency.



1.INTRODUCCIÓN

La EPS SEDA AYACUCHO S. A. Es la empresa prestadora de los servicios de agua y saneamiento de las ciudades de Huamanga y Huanta del departamento de Ayacucho y atiende una población urbana total de aproximadamente 230 000 habitantes, la mayor parte de la cual está asentada en la ciudad de Huamanga con 197 000 habitantes (86%). (SEDA, 2015).

La mayor parte de las aguas residuales procedentes de la ciudad de Huamanga son tratadas en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) “La Tatora” como se puede ver en la figura 1. Con una capacidad hidráulica de 470 L/s y una capacidad de tratamiento de la carga orgánica de aproximadamente 156 220 habitantes-equivalentes (50 g DBO5/hab.d). (SEDA, 2015).

Por otro lado, la contaminación del agua puede definirse como la alteración de su calidad por la acción natural o humana que hace que no sea adecuada para la aplicación a la que se destina. Las alteraciones que puede sufrir el agua pueden ser físicas, químicas o biológicas (Barboza, 2013).

Asimismo, las aguas residuales Son principalmente las aguas de abastecimiento de una población, después de haber sido contaminadas por diversos usos o procesos. Se denomina aguas residuales a aquellas que resultan del uso doméstico o industrial del agua. Se les llama también aguas servidas, aguas negras o aguas cloacales. Son residuales pues, habiendo sido usada el agua, constituyen un residuo, algo que no sirve para el usuario directo; son negras por el color que habitualmente tienen. Algunos autores hacen una diferencia entre aguas servidas y aguas residuales en el sentido que las primeras solo provendrían del uso doméstico y las segundas corresponderían a la mezcla de aguas domésticas e Industriales. (Torres & Briceño, 2016).

Los niveles de tratamiento de las aguas residuales se pueden someter a diferentes niveles de tratamiento, dependiendo del grado de purificación que se quiera. Es tradicional hablar de tratamiento primario, secundario, etc., aunque muchas veces la separación entre ellos no es totalmente clara. Así se pueden distinguir: (Trapode, 2016). Es un tipo de tratamiento más caro que los anteriores y se usa en casos más especiales: para purificar desechos de algunas industrias, especialmente en los países más desarrollados, o en las zonas con escasez de agua que necesitan purificarla para volverla a usar como potable, en las zonas declaradas sensibles (con peligro de eutrofización) en las que los vertidos deben ser bajos en nitrógeno y fósforo, etc. (Trapode, 2016).

El desarenado consiste en un proceso en el que se produce una separación por decantación diferencial o selectiva en forma discreta, de todos aquellos sólidos en suspensión de densidad elevada (compuestos inorgánicos), impidiendo la sedimentación de la materia en suspensión de baja densidad (de naturaleza orgánica). (Sainz, 2005). Los desarenadores con control de velocidad son canales de sedimentación largos y estrechos, generalmente se cuenta con un mínimo de dos canales para fines de limpieza. En ocasiones, se emplean varios canales para el control de la velocidad, pero se puede lograr un arreglo más económico y eficiente usando un panel de control a la entrada y salida del mismo. Las secciones de control incluyen vertedores proporcionales tipo Sutro, canales Parshall, canal parabólico (Ruiz, 2010). Como en la figura 3.

Cuando se haga el diseño del pretratamiento hay que tener muy en cuenta el volumen de arenas extraídas, ya que su falta de previsión puede dar importantes problemas de funcionamiento en la depuradora al llegar volúmenes superiores a los considerados

teóricamente. Esto puede ocurrir en poblaciones con calles sin pavimentar, con redes de alcantarillado en mal estado. Si no tenemos datos reales de la cantidad de arena posible, es necesario calcular por exceso los volúmenes de extracción, considerando valores normales (Metcalf & Eddy, 1996): Redes Separativas 5 L/m³ de agua residual y Redes Unitarias 50 L/m³ de agua residual. Otro dato a tener en cuenta proveniente de varias plantas es que se pueden recoger de 1-15 L/hab/año.

Los hidrociclones tienen múltiples usos en las industrias como: en la petroquímica, alimentarias, en cabezal de riego para fertirrigación; sin embargo, el uso más frecuente lo hacen en la industria de procesamiento de minerales. (Doroteo, 2010).

El hidrociclón se puede usar como espesador, clasificador y separador. En un tiempo relativamente breve se ha convertido en una pieza de equipo establecida para un gran número de procesos industriales, como en este caso, en la implementación del sistema de lavado de suelos asistido por surfactantes (Doroteo, 2010).

En forma general, los hidrociclones se clasifican en: hidrociclón simple y multiciclón. Los simples poseen una sola unidad, son de gran diámetro y para aumentar su eficiencia de colección o su capacidad, se realizan arreglos en serie, paralelo, o se instala una recirculación; por el contrario, los multiciclones son la unión en paralelo de varias unidades de menor diámetro en una cámara rectangular, logrando así mayores eficiencias (Arismendy, 2013).

2.MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Forma del hidrociclón

El hidrociclón tiene forma cilíndrica y cónica, el material utilizado se ha elegido en criterio a la disponibilidad del material en el mercado local y con el fluido a trabajar de esta manera se ha elegido planchas de hierro galvanizado de 1,20 mm de espesor y tubería PVC de 2" para la alimentación desde el desarenador hasta el hidrociclón.

2.2. Diseño del hidrociclón

El diseño del hidrociclón se ha realizado en función al método descrito al cálculo basado en el criterio de velocidad de flujo y el caudal.

La literatura presenta el rango de parámetros de diseño, el cual se presenta en la tabla 1.

Tabla 1.

Parámetros de diseño de hidrociclones de entrada tangencial.

PARÁMETROS	VALOR
Diámetro del hidrociclón	< 1,0 m
Velocidad de alimentación	3,7 – 6,1 m/s
Presión de alimentación	50 – 100 psi

Fuente. (Barrera, Urrutia & Tolvett,2010).

Para la determinación del área de flujo de ingreso al hidrociclón se ha tomado en cuenta el rango de velocidad de entrada presentado en la tabla 1 que esta desde 3,7 – 6,1 m/s, tomando como velocidad de ingreso 4,1 m/s de acuerdo al diámetro de la tubería que existe en el mercado local,

ya que si se tomaría un tubo de cédula 40 los diámetros no consideran a los cálculos encontrados, por el que más se ajusta es la tubería de 2 pulgadas OD. también cumpliendo con el rango de la velocidad indicada de ingreso al hidrociclón y tomando en cuenta el caudal escogido de acuerdo al dimensionamiento del equipo, con estos valores obtenidos se ha determinado el diámetro de la parte cilíndrica del hidrociclón, con ese valor de diámetro se ha calculado el resto de las configuraciones de la figura 1. El caudal y la velocidad determinada se muestra en la siguiente tabla 15, la capacidad del colector de arena fue 30 kg para un tiempo de operación de una hora, determinada en función a la concentración de ingreso al equipo y la presión de ingreso al hidrociclón de acuerdo a la literatura un rebose normal presenta una presión de 4 psi. Los resultados de diseño se muestran en la tabla 2.

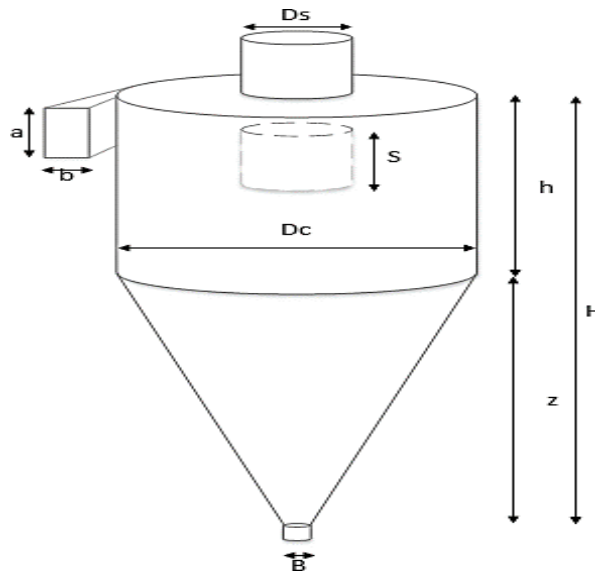
Tabla 2.

Parámetros de diseño del hidrociclón.

Velocidad de entrada	Presión ingreso	Caudal	Cantidad de arenas acumulada en el Colector	Tiempo de operación
(m/s)	(psi)	(L/s)	(kg)	(h)
4,1	4	8	30	1

Figura 1.

Configuración física del hidrociclón.



Fuente. (Echeverri,2006)

Se ha elegido el hidrociclón de alta eficiencia STAIRMAND, debido a que el 51,24 % de arenas son de 0,071 mm de tamaño, porque estos hidrociclones son capaces de remover partículas más pequeñas con una buena eficiencia, las correlaciones se muestran en la tabla 3.

El área se ha determinado una vez elegido como base de diseño el caudal y la elección de la velocidad de ingreso.

2.3. Área transversal del ingreso al hidrociclón

El área transversal se ha calculado una vez conocida la velocidad y caudal de ingreso, mediante

la ecuación (1).

$$A_{in} = \frac{Q}{v_{in}} \quad (1)$$

$$A_{in} = \frac{8 \times 10^{-3} \text{ m/s}}{4.1 \text{ m/s}}$$

$$A_{in} = 0,001951 \text{ m}^2$$

Para un hidrociclón tipo Stairmand se tiene las siguientes correlaciones:

Tabla 3

Nomenclatura de los hidrociclones de alta eficiencia STAIRMAND.

DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	NOMENCLATUR A	STAIRMAND
Diámetro del hidrociclón	Dc	Dc/Dc	1,0
Altura de entrada	a	a/Dc	0,5
Ancho de entrada	b	b/Dc	0,2
Altura de salida	S	S/Dc	0,5
Diámetro de salida	Ds	Ds/Dc	0,5
Altura parte cilíndrica	h	h/Dc	1,5
Altura parte cónica	z	z/Dc	2,5
Altura total del hidrociclón	H	H/Dc	4,0
Diámetro salida de partículas	B	B/Dc	0,375

Fuente. (Echeverri, 2006).

La entrada rectangular a la parte cilíndrica se ha representado de la siguiente manera: Área del ducto de entrada = $a \times b$ (*)

Altura de entrada al hidrociclón (a) = $0,5 Dc$

Ancho de entrada al hidrociclón (b) = $0,2 Dc$

Estos valores se aprecian en la tabla 4.

Igualando nuestras ecuaciones:

$$(*) \quad a \times b = 0,5 Dc \times 0,2 Dc = 0,001951 \text{ m}^2$$

El material con el que se ha construido el hidrociclón fue planchas de hierro galvanizado de 1,20 mm de espesor.

2.4. Diámetro del hidrociclón

La ecuación (2) fue para calcular el diámetro del hidrociclón con los datos del área rectangular.

$$D_c = \sqrt{\frac{A_{in}}{0,5 \times 0,2}} \quad (2)$$

$$D_c = \sqrt{\frac{0,001951 \text{ m}^2}{0,5 \times 0,2}}$$

$$D_c = 0,1397 \text{ m} = 14_c$$

Una vez calculado el diámetro del hidrociclón se ha calculado el resto de las correlaciones como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4.

Dimensiones del hidrociclón.

Descripción	Símbolo	Medida calculada (cm)	(*) Medida asumida (cm)
Diámetro del hidrociclón	Dc	14,0	14,0
Altura de entrada	a	7,0	7,00
Ancho de entrada	b	2,8	3,00
Altura de salida	S	7,0	7,00
Diámetro de salida	Ds	7,0	7,62
Altura parte cilíndrica	h	21,0	21,0
Altura parte cónica	z	35,0	35,0
Altura total del hidrociclón	H	56,0	56,0
Diámetro salido de partículas	B	5,25	5,00
Ángulo de cono = 12° θ	Dc		

Nota. La medida asumida se refiere a las medidas comerciales que se encuentran en el mercado local ya sea de tuberías y otros accesorios, que se ajustan al dimensionamiento de este equipo que se ha construido.

El ángulo de la sección cónica es 12° para hidrociclones < 10 pulg y hasta 20° para hidrociclones > 10 pulg. La presión mínima para obtener un Overflow normal es 4 psi para hidrociclones. < 10 pulg y 7 psi para hidrociclones.> 10 pulg, menciona Krebs Engineers. (Segura, 2009).

Una vez obtenida las medidas de las dimensiones del hidrociclón, se ha empezado con el diseño en dibujo 3D para ver cómo quedaría con estas medidas (tabla 4) de la misma manera para ver su mejor visualización como se puede apreciar en la figura 2. Para luego proceder con la construcción del equipo completo del hidrociclón.

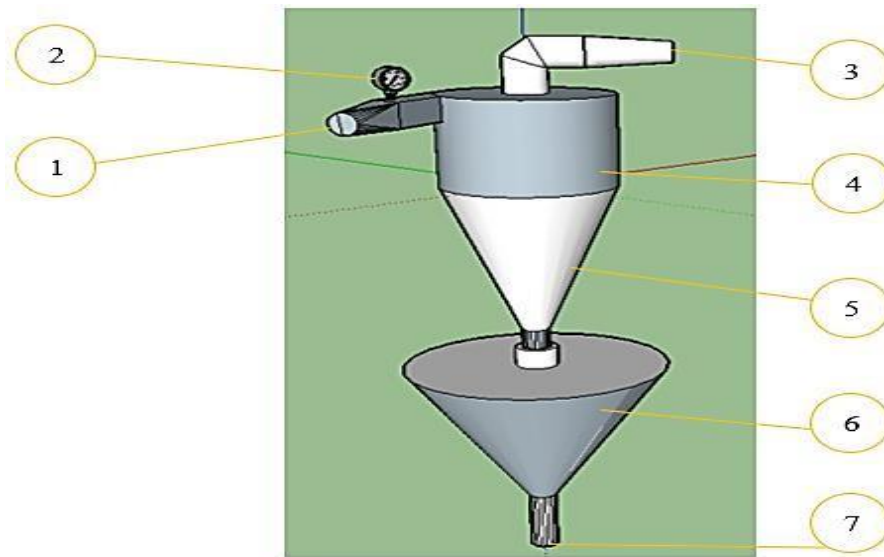
2.5. Número de Reynold

Con el fin de conocer las condiciones de flujo al ingreso del hidrociclón si se encuentra en los parámetros establecidos de 10^4 - 10^6 , ahora lo comprobaremos mediante la ecuación (3). Como se sabe el caudal es 8 L/s y el área de ingreso según las medidas definidas fue 0,0195120 m².

La velocidad de ingreso al hidrociclón es 4,1 m/s, la densidad del flujo de ingreso al hidrociclón se ha tomado como la densidad de agua debido a que se encuentra en mayor proporción con 99% de agua, entonces la densidad es 0,9721 g/mL a una temperatura de ingreso de 21,23°C

Figura 2.

Diseño del hidrociclón ensamblado con el colector de arena.



1. Entrada (Inlet) a la parte cilíndrica del hidrociclón
2. Manómetro instalado a la entrada del hidrociclón
3. Salida (Overflow) superior del hidrociclón
4. Parte cilíndrica del hidrociclón
5. Parte cónica del hidrociclón
6. Colector de arena del hidrociclón
7. Salida (Underflow) inferior del colector de arena

2.9. Cubicación, dimensionamiento de los componentes

Una vez diseñada el hidrociclón y obtenida las medidas calculadas como se observa en la tabla 4 se ha llegado a dar las medidas correspondientes a las planchas de hierro galvanizado de 1,20 mm de espesor.

2.10. Para la parte cilíndrica del hidrociclón

Para calcular la longitud de corte de la plancha se ha utilizado la siguiente ecuación (6)

$$L_c = \pi \times \phi \quad (6)$$

Donde:

L_c : Longitud de corte (cm)

π : pi (3,1416)

ϕ : Diámetro del hidrociclón (14 cm)

$$L_c = \pi(14) = 44 \text{ cm}$$

Una vez calculado la longitud de corte se procedió al corte de la plancha, pero se sabe que la altura del cilindro es 21 cm como se puede apreciar en la Figura 2, entonces el corte de la plancha fue:

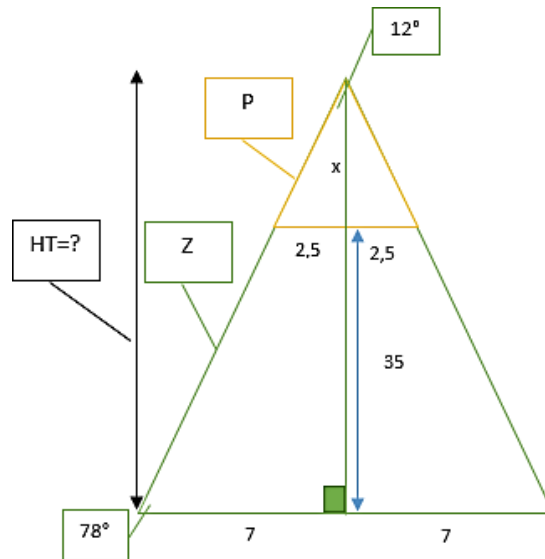
$$\text{Corte de la plancha} = 44 \text{ cm} \times 21 \text{ cm}$$

2.11. Para la parte cónica del hidrociclón

En el diseño para la parte cónica, el ángulo de la sección cónica es 12° para hidrociclones < 10 pulg menciona Krebs Engineers. Luego se ha hecho los cálculos correspondientes para determinar el ángulo grande, pequeño para juntar y formar el diámetro mayor y menor del cono, por lo tanto, ambos ángulos tienen que tener el mismo valor, obteniendo resultados de mismos valores tanto para diámetro mayor y menor, se ha determinado utilizando los datos de la figura 3.

Figura 3.

Representación de la parte cónica del hidrociclón.



Entonces calculando, será representado de la siguiente forma:

$$\frac{X + 35}{7} = \frac{X}{2,5}$$

$$X = 19,4444 \text{ cm}$$

$$HT = 54,4444 \text{ cm}$$

Calculando la hipotenusa, las unidades están representadas en cm.

$$Z = \sqrt{(54,4444)^2 + (7)^2} = 54,892555$$

$$P = \sqrt{(19,4444)^2 + (2,5)^2} = 19,604455$$

$$L_g = \pi \times \phi_g = \pi(14) = 43,982297$$

$$L_p = \pi \times \phi_p = \pi(5) = 15,707963$$

Donde:

L_g : Longitud grande

L_p : Longitud pequeño
 Ángulo mayor

$$\alpha_g = \frac{L_g \times 180^\circ}{Z \times \pi} = 45,9079^\circ$$

Ángulo menor

$$\alpha_p = \frac{L_p \times 180^\circ}{P \times \pi} = 45,9079^\circ$$

Una vez calculadas las medidas y los ángulos pasaron por el respectivo corte.

2.13. Construcción del hidrociclón y su colector

Para la construcción del hidrociclón, previamente se ha seleccionado el tipo y la geometría del material con la que se ha trabajado, de acuerdo a la disponibilidad y costo de dicho material en el mercado local. De modo que se ha construido con plancha de hierro galvanizado de 1,20 mm de espesor con 14 centímetros de diámetro la parte cilíndrica del hidrociclón, con una altura cilíndrica de 21 cm y con una altura de la parte cónica de 35 cm como muestra en la figura 4.

2.14. Construcción del módulo para el hidrociclón y su colector

El módulo de soporte del hidrociclón, también se ha construido en el taller electromecánico “Holger K. Hansen” de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga como muestra la figura 5.

Figura 4.

Construcción del hidrociclón.



Figura 5.

Construcción del módulo para el soporte del hidrociclón



2.15. Construcción del soporte para la electrobomba sumergible

Para el módulo de soporte para la electrobomba, el material empleado también fue hierro galvanizado tubo cuadrado de 1 pulgada de diámetro. 20 cm² fue la base para que la bomba sea sujeta y fija, cuatro fierros de 3/8 de pulgadas de diámetro para ser sujeta desde la base de la plataforma construida para ser aseguradas a la superficie del desarenador de ambos lados frente a frente para su mejor estabilidad , también se ha colocado 4 fierros 5/8 de pulgadas de 60 cm de largo para ser sujeta desde la superficie irregular de los sólidos acumulados, todo se ha realizado para su mejor funcionamiento ya con este soporte fue sumergida a 40 cm del nivel del agua residual para su succionamiento correcto.

Figura 6.

Construcción del módulo para el soporte de la electrobomba



2.16. Ensamblado de los componentes del hidrociclón

Los componentes una vez unidos al hidrociclón fueron pasados al ensamblado de todo el equipo, dando finalizado la construcción del equipo completo. Como se puede ver en la figura 7.

2.17. Pruebas hidráulicas “sin carga”

Las pruebas se hicieron con fines de encontrar fugas en los componentes del equipo ya sea en el momento de la soldadura o en el acabado de los componentes, habiéndose encontrado sin fuga al momento de la prueba.

Figura 7.

Ensamblado de los componentes del hidrociclón.



2.18. Pruebas hidráulicas “con carga”

En esta última parte se ha realizado las pruebas con muestras de agua con arena en suspensión para ver sus primeros detalles e imprevistos durante el funcionamiento del hidrociclón, la muestra se ha preparado en un bidón de 100 L, donde se ha sumergido la electrobomba y se ha realizado las instalaciones correctas para su funcionamiento.

Por lo tanto los resultados con problemas de ajustes en la succión de la electrobomba y mejorando todos los detalles encontrados que posteriormente se ha encontrado pocos problemas durante la instalación y evaluación “La Totora”.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

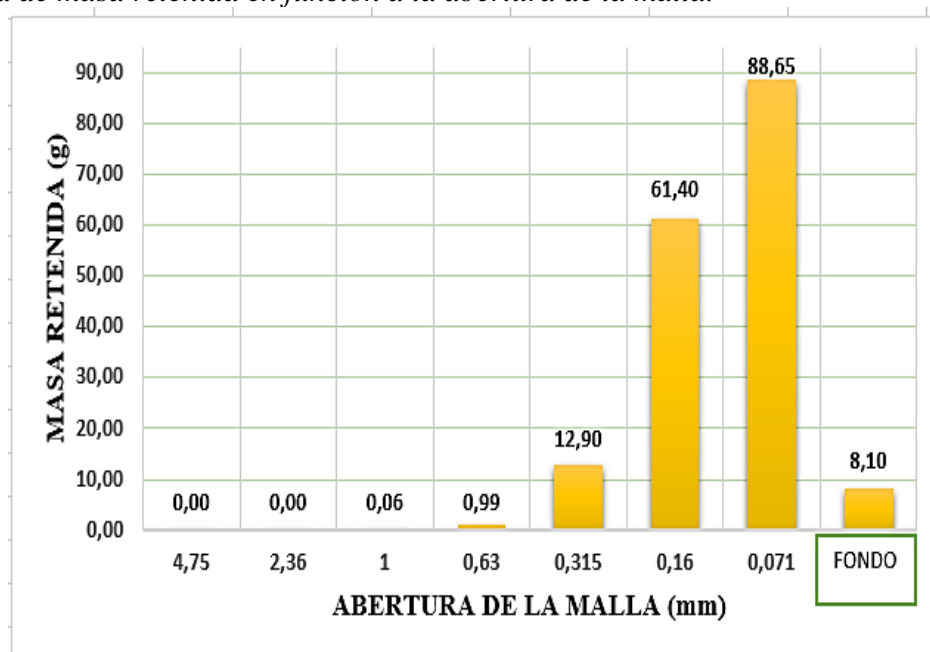
3.1. Granulometría

No hay una Norma específica para la granulometría de las arenas del desarenador, por lo tanto, se ha tomado la Norma ASTM C 33 donde se estipulan los requisitos que permiten una relativa amplitud de variación en la granulometría del agregado fino, se ha aplicado esta Norma debido a que en el desarenador no se ha encontrado gravas solamente arenas finas que son nada menos agregados finos con diferencia que estas arenas están contenidos de materia orgánica. La muestra (arena) del desarenador se ha realizado un previo lavado con HCl (1:1) con agua debido a que la arena estuvo contaminada con materia orgánica.

El resultado de la granulometría indica que es demasiado la finura de las arenas del desarenador, dando como diámetro mínimo 0,0071 cm y como diámetro máximo 0,1 cm. De acuerdo a la figura 58 se interpreta que el 0,035 % de arenas son retenidas en la malla de 1 mm y el mayor porcentaje que es 51,24 % son las retenidas en la malla 0,071 mm, indica que este tamaño es la que esta acumulada en mayor cantidad en el fondo del desarenador ver figura 8.

Figura 8.

Cantidad de masa retenida en función a la abertura de la malla.



3.2. Características físicas

Las características físicas de las arenas residuales provenientes de la unidad de desarenador de la PTAR “La Totorá”, sus resultados están representados en la tabla 5.

Fue muy importante el estudio de la caracterización de las arenas residuales para poder determinar los parámetros de evaluación del desarenador.

En la literatura la gravedad específica de la arena pura es de 2,65 en cambio en el trabajo realizado se ha reportado 2,6208, este valor debido a que la arena contiene materia orgánica, material particulado, entre otros, contenidos estas partículas la arena tiende a flotar en el agua y es causante de esta gravedad obtenida.

Tabla 5.*Características físicas de las arenas residuales.*

Arenas residuales de la PTAR “La Tatora”	
Color	Gris oscuro
Olor	Fétido, nauseabundo
Forma	Circular
Textura	Duro
Apariencia	Grano fino
Impurezas	Alto contenido de impurezas
Densidad aparente	1,1836 g/mL
Gravedad específica	2,6208
Humedad	82,87 %

La caracterización física de las arenas residuales de la unidad de desarenador de la PTAR “La Tatora” ha presentado los siguientes resultados: Densidad aparente 1,1836 g/ml, gravedad específica 2,6208 y humedad 82,87 %.

3.3. Característica química

Se ha obtenido un promedio de 10,7 % de materia orgánica presente en las arenas residuales retiradas de la unidad de desarenador.

La composición de materia orgánica presente en las arenas retiradas de la unidad de desarenador es variada por diferentes aspectos y factores como: temporada de estiaje, temporada de lluvia y manejo de la unidad de desarenador.

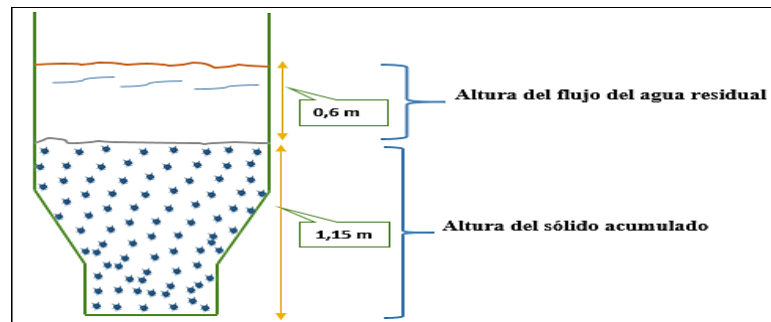
3.4. Parámetros de operación del canal del desarenador

Los parámetros obtenidos son del funcionamiento del desarenador que actualmente opera la PTAR Tatora. En la figura 9 se muestra la cantidad de sólidos que se acumulan en el desarenador, se ha realizado esta medida en el momento de la descarga de los sólidos acumulados.

se ha observado que el flujo del agua residual solo tiene una altura de 60 cm, lo cual nos ha indicado que a medida que se reduce la altura o área de flujo del agua residual, las arenas de menores diámetros no llegan a sedimentar por el aumento de la velocidad longitudinal del desarenador, la planta de tratamiento de aguas residuales “La Tatora” el retiro de los sólidos acumulados en el desarenador lo realiza mensual en temporadas de estiaje y en temporada de lluvia lo realizan dos veces por mes

La altura de los sólidos totales acumulados es de 1,15 m promedio durante un mes de operación en temporada de lluvia, la altura total del interior del desarenador hasta la superficie es 2,50 m.

Figura 9.
Cantidad de sólidos acumulados en el desarenador.



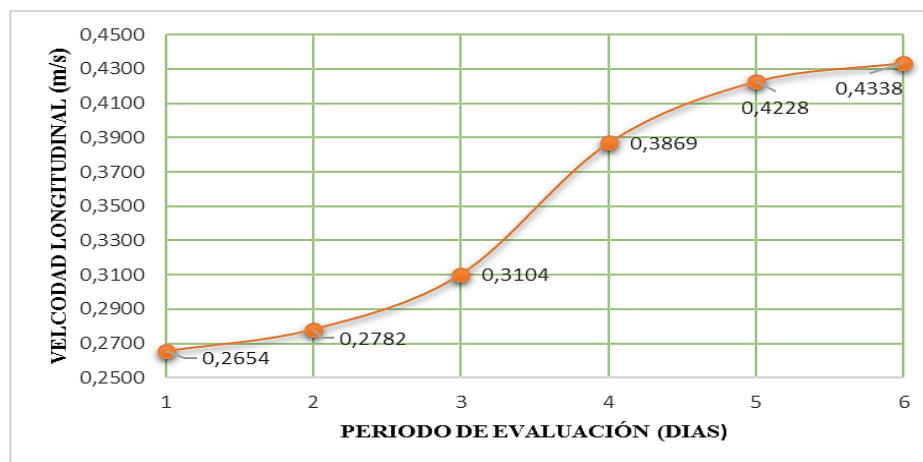
3.4.1. Velocidad longitudinal con técnica de sin aforo.

La velocidad longitudinal evaluada con tres esferas, de los cuales dos son de material tecnopor y uno de polietileno, el resultado obtenido de las tres esferas solo uno presenta poco error y es la de material de polietileno que da como resultado 0,2758 m/s, sin embargo, esta velocidad se da solo en la superficie del agua residual mas no a diferentes alturas de profundidad, comparando con la evaluación de la velocidad longitudinal determinada con área y caudal el resultado es 0,2654 m/s la diferencia de estos valores es muy notorio, por tal motivo no se ha trabajado con esta técnica debido a que no brinda resultados exactos.

3.4.2. Comportamiento de la velocidad longitudinal en función al área y caudal

Se ha evaluado en el periodo de mes octubre y se ha realizado con una frecuencia de interdiarios por las mañanas en hora punta. Para ver cómo está trabajando el desarenador en esas circunstancias.

Figura 10.
Comportamiento de la velocidad longitudinal en función al área y caudal



En la figura 10 la velocidad longitudinal del desarenador se ha llegado a notar que desde 0,3104 m/s hay un aumento demasiado de velocidad y esta causa es por el aumento del caudal, los desniveles de altura del flujo de agua residual en los 30 m de longitud hicieron un demasiado incremento de velocidad del flujo del agua del desarenador y así reduciendo el área de flujo del agua residual, debido a la fuerte lluvia ocurrido durante esa semana. Llegando hasta 0,4338 m/s de velocidad máxima, lo cual nos ha indicado que el desarenador en temporadas de lluvia la remoción de arenas se debe realizar dos veces al mes, debido a

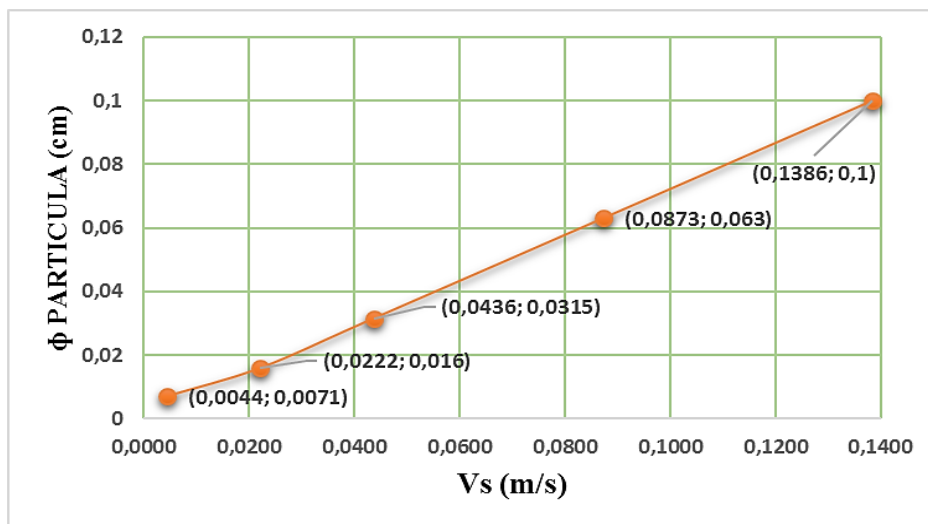
que la velocidad longitudinal de un desarenador horizontal debe estar en un rango de 0,25 m/s – 0,30 m/s como lo establece (O.S.090) y solo a este rango se mantiene hasta segunda semana del mes.

3.4.3. Comportamiento de la velocidad de sedimentación de las arenas

Es la velocidad con la que se depositan las arenas de diferentes diámetros en el fondo del desarenador, las muestras de arenas residuales se tomaron del fondo acumulado del desarenador y del lecho de secado de la PTAR. Haciendo el estudio de la granulometría de las arenas se ha llegado a tener como máximo 0,1 cm y 0,0071 cm como mínimo de diámetro de las arenas. En la figura 11 nos indica que los valores de la velocidad de sedimentación fluctúan en el rango de 0,0044 a 0,1386 m/s. Ojo en la figura los valores dentro del paréntesis se encuentra los ejes (x; y).

Figura 11.

Comportamiento de la velocidad de sedimentación de arenas residuales



En la figura 11 podemos observar que la velocidad de sedimentación de la arena más rápida es de 0,1386 m/s debido al diámetro mayor que presenta esta arena que es 0,1 cm, mientras la velocidad de sedimentación más lenta 0,0044 m/s la que presenta la arena de menor diámetro, debido que este último es de régimen laminar y las velocidades desde (0,0222 a 0,1386) m/s son de régimen transición. Esto nos indica que la velocidad de sedimentación de las arenas es directamente proporcional al diámetro.

3.4.4. Comportamiento del tiempo de retención de las arenas residuales

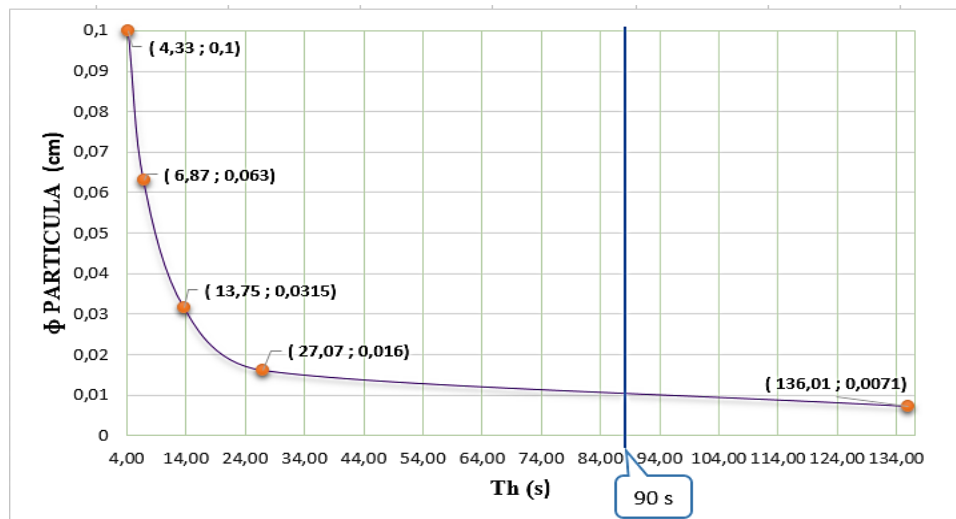
En la figura 12 se aprecia el tiempo que demora las arenas en depositarse en el fondo del desarenador, de igual manera se trabaja con las muestras de arenas del desarenador con la granulometría ya establecida. Los valores del tiempo de retención de arenas fluctúan en un rango de 4,2733 a 134,0496 segundos desde arenas de mayor a menor diámetro

El tiempo de sedimentación más rápida presenta la arena de mayor diámetro de 0,1 cm, que sedimenta en 4,33 segundos y el menor tiempo en sedimentar presenta la arena de 0,016 cm de diámetro que sedimenta en 27,07 segundos. En la figura 19 se muestra una separación del ultimo valor que es 136,01 segundos con el resto de los valores, Este tiempo de sedimentación de diámetro 0,0071 cm no deberían sedimentar en el desarenador, debido a

que el flujo del agua residual en los 30 m de distancia de recorrido demora 90 s como lo establece (O.S.090). Por tal motivo este último pasara a la siguiente unidad de tratamiento de la PTAR.

Figura 12.

Comportamiento del tiempo de retención de las arenas residuales



De otro modo sedimentará solo en las primeras semanas una vez retiradas las arenas del desarenador debido a que el agua demora más de 100 segundos en el desarenador por la presencia de mayor área de flujo. Además, las arenas de este último diámetro no vienen por separado más si aglomerados con las arenas de mayor diámetro portal sentido llegan sedimentar en el desarenador.

3.4.5. Comportamiento de sólidos totales y arenas acumulados

Saber la cantidad de sólidos acumulados en el desarenador es de mucha importancia, proporciona información de la cantidad que se depositan en los dos horizontales del desarenador tanto sólidos como arenas, etc.

Para determinar esta acumulación se ha trabajado de dos maneras una con la técnica de sedimentación con los conos Imhoff y la otra con la técnica de determinación de sólidos totales.

3.4.6. Determinación en volumen de sólidos y arenas con la ayuda de conos Imhoff.

La determinación en volumen de los sólidos nos brinda resultados correctos, debido que en el cono Imhoff las partículas de mayores diámetros que no son arenas llegan a depositarse en la base, cuando debería ser lo contrario, estas partículas mayores dejan vacíos en esa área, las arenas se depositan por encima de estas partículas y así midiendo el volumen no exacto.

Además, la medida en volumen no se da exacto porque la separación en el cono Imhoff ya sea de sólidos totales, arenas, arcillas, etc. No se aprecia claro, las medidas se hicieron en la separación una de otra en transición. Obteniendo 5,5 mL de arena en 1L de muestra, resultados demasiado alto para calcular la acumulación en el desarenador, por ende, no se ha aplicado esta técnica.

3.4.7. Determinación con técnica de sólidos totales

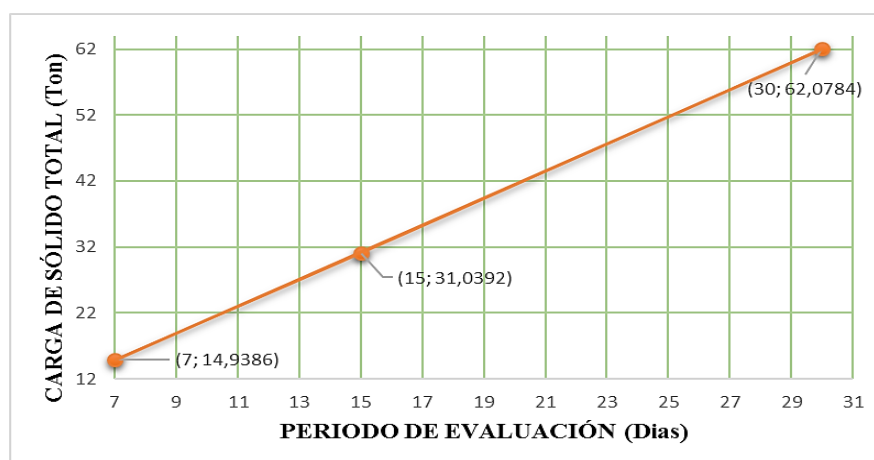
En esta técnica la muestra se ha sometido en un horno a 105 °C, donde el agua se ha volatilizado quedando los sólidos totales y se ha determinado la concentración de sólidos en la muestra.

(a) Sólidos totales acumulados en el desarenador

En la figura 13 se muestra la acumulación de sólidos totales en diferentes tiempos donde los valores fluctúan de 14,9386 a 62,0784 toneladas. Las concentraciones de sólidos totales son tomadas en dos puntos en la entrada y salida del desarenador para tener como acumulación en el desarenador.

Figura 13.

Comportamiento de solidos totales acumulados en el desarenador.



La acumulación de sólidos totales como se puede apreciar en la figura 13 que en una semana se acumula 14,9386 toneladas y durante un mes llegándose acumular 62,0784 toneladas de sólidos, son retirados de los dos canales de desarenador. La PTAR “La Totorá” reporta con rango de 50 a 60 metro cúbicos de sólidos totales retiradas en un mes de operación de los dos horizontales del desarenador como se ve en el Anexo 4.

La conversión en toneladas simplemente es multiplicar con la densidad aparente de las arenas residuales que es 1180 kg/m³, lo cual indica que la determinación de sólidos está dentro del rango de la cantidad retirada de la PTAR.

3.4.8. Arena pura acumulado en el desarenador

Las concentraciones de sólidos totales muestreadas en el ingreso y salida del desarenador también sirvieron para determinar la concentración de la arena pura, pero en este caso la muestra después de haberse sometido a 105°C en un horno para determinar sólidos totales una vez volatilizado el agua, se llevó a una mufla a 550°C durante 20 minutos a esa temperatura quedando solo arena pura, donde se ha volatilizado todas las partículas sólidas orgánicas.

3.5. Parámetros de operación del hidrociclón

Los parámetros fundamentales para el funcionamiento del hidrociclón fueron obtenidos durante el tiempo de evaluación estos son: Caudal de alimentación y presión de ingreso respetando el rango de velocidad de ingreso del fluido para el buen funcionamiento del hidrociclón, que a futuro podrán servir para llevar a nivel planta más adelante.

3.6. Remoción de sólidos con hidrociclón

La remoción tiene como finalidad concentrar la cantidad de sólidos en la descarga inferior y la menor en el rebose, aunque en algunos casos se genera una clasificación de separar partículas por tamaños, densidad de las partículas y otros factores que generan esta separación. Pero en este trabajo de investigación la granulometría realizada nos ha brindado datos para la evaluación, ahora lo que da más importancia es la cantidad de sólidos en la descarga inferior especialmente de la arena y casi nada de arena en la salida del hidrociclón (rebose).

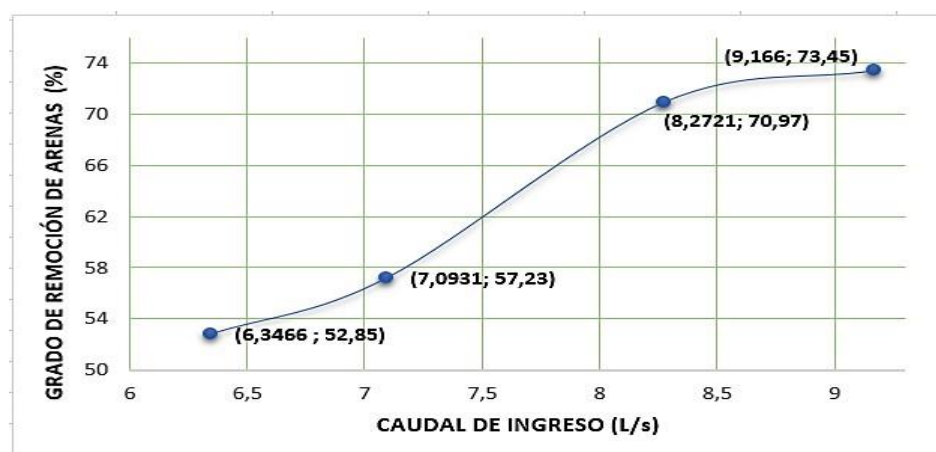
Teniendo en cuenta las variables a modificar en la evaluación se procedió a comenzar con el bombeo para calibrar con la válvula el caudal de ingreso, el flujo máximo que ha proporcionado la electrobomba de alimentación al hidrociclón fue 9,1660 L/s.

3.7. Caudal y tiempo de retención hidráulico

La operación del sistema se ha iniciado con caudal de arranque de 8,2721 L/s, para un tiempo de residencia hidráulico de 1,36 segundos durante una hora de operación del equipo para tener capacidad de remoción de arenas residuales. Una vez alcanzada la estabilidad bajo las condiciones iniciales, se ha ido incrementando y bajando el caudal progresivamente, mediante la técnica del aforo, hasta alcanzar los 9,1660 L/s para un tiempo de residencia hidráulico de 1,25 segundos en una hora de operación y bajar hasta 6,4426 L/s en 1,48 segundos. En la figura 14, se puede apreciar la variación del caudal durante la evaluación del sistema, a medida que el sistema alcance la máxima remoción.

Figura 14.

Comportamiento de la eficiencia del hidrociclón.

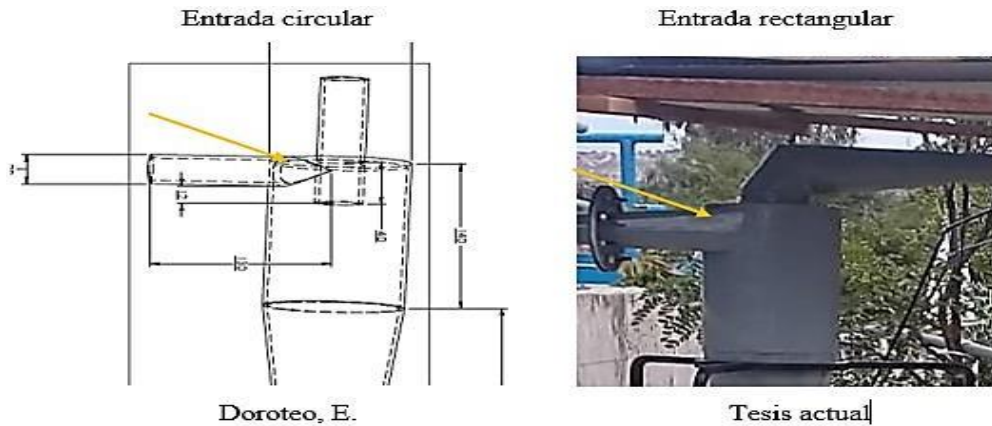


La eficiencia de remoción de las arenas residuales en relación al caudal de alimentación ha alcanzado un máximo de 73,45 % y mínimo 52,85 %, mejorando así el caudal de diseño que solo ha llegado a 70,97 % de eficiencia. Esto debido que a mayor caudal de alimentación aumenta la velocidad de ingreso, estando en el rango de velocidad establecido para el

funcionamiento del hidrociclón, pero si se alimenta por encima de 11 L/s la estructura del hidrociclón no llegara a soportar demasiado caudal llegando a colapsar y pasar el límite del rango de velocidad y dando como resultado una demasiada disminución de la eficiencia.

Figura 15.

Valores de turbiedad de ingreso.

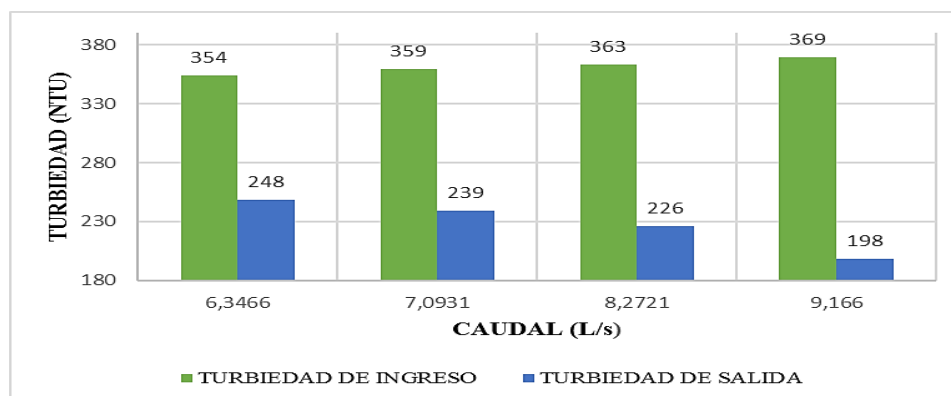


A pesar de que son investigaciones casi parecidos en el trabajo realizado se reporta una eficiencia mayor comparado al de Doroteo, al evaluar su trabajo de construcción del hidrociclón se observa que las ecuaciones usadas para dimensionamiento están referidos para minerales (Rietema) y que tienen un comportamiento diferente ya que se toma un valor de diámetro de corte del 50% (d_{50c}) más utilizada en la flotación de minerales, por tal motivo reporta una eficiencia baja, porque no todo los sólidos quedan separadas en la parte inferior (descarga) del hidrociclón, en cambio en este diseño que se ha realizado se tomó ecuaciones de un ciclón de alta eficiencia reportado por STAIRMAND que da una transformación de un diámetro circular a una entrada rectangular al hidrociclón, especialmente para sólidos de menor tamaño.

3.8. Comportamiento de turbiedad

La turbiedad se ha tomado en un segundo plano, porque que hubo la necesidad de tomarlo en cuenta debido a que presenta a simple vista un cambio en la turbiedad a la salida superior del hidrociclón (rebose) en comparación a la entrada del hidrociclón. La toma de muestra se ha realizado a la entrada y salida como ya se ha mencionado. En la figura 16 indica que los valores de turbiedad de ingreso o captación fluctúan en el rango 354 a 369 NTU y a la salida del hidrociclón (rebose) fluctúan en el rango de 248 a 198 NTU, lo que indica que hay buena remoción de la turbiedad.

Figura 16.
Comportamiento de la turbiedad



En la figura 16, se observa que a medida que el caudal aumenta, disminuye la turbiedad a la salida del hidrociclón (rebose), se observa que con caudal de alimentación de 9,166 L/s se ha obtenido una turbiedad de 198 NTU en la salida superior del hidrociclón, siendo muy buena alternativa para la disminución de la turbiedad del desarenador, ya que la turbiedad con la que desemboca el efluente de la PTAR al río alameda es un promedio de 86 NTU. En comparación con la turbiedad de la salida del hidrociclón este podría bajar a menos de 86 NTU en el efluente de la PTAR.

4. CONCLUSIONES

Se ha evaluado los parámetros de operación del canal del desarenador con las dimensiones siguientes: Longitud de canal: 30 m, ancho del canal: 1,20 m, altura del canal: 2,50 m, altura de trabajo de operación del canal: 1,15 m, caudal máximo: 0,650 m³/s, concentración de ingreso de arena: 0,12166 kg/m³, concentración de salida de arena: 0,07746 kg/m³, velocidad longitudinal óptimo: 0,3104 m/s, velocidad de sedimentación óptimo: 0,0222 m/s, tiempo de retención de arenas óptimo: 27,0651 s y acumulación de sólidos totales en un mes 62,0784 toneladas. Los datos de concentración corroboran que el canal horizontal de desarenado no está cumpliendo su función de retener el mayor porcentaje de arena.

El contenido de materia orgánica fue 10,7% que es parte de la arena. Gravedad específica: 2,6208, densidad aparente: 11 836 kg/m³, humedad: 82,87%. De acuerdo a los resultados experimentales el hidrociclón ha experimentado una buena eficiencia, ya que se ha alcanzado una remoción máxima en función a la arena de 73,45%, bajo condiciones de una hora de operación, mientras en la literatura los ciclones de alta eficiencia alcanzan un 90% de remoción con partículas de menores tamaños. En base a la evaluación de las variables de proceso también se ha determinado los parámetros de operación para el hidrociclón a nivel piloto en la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totorá” de la ciudad de Ayacucho: Tiempo de retención hidráulico: 1,25 s, caudal de operación: 9,1660 L/s, presión de ingreso: 9 psi. También se ha observado que hay una tendencia a disminuir la eficiencia del hidrociclón cuando aumenta el caudal de ingreso por encima de 11 L/s debido a que el hidrociclón está diseñado para 8 L/s una vez sobrepasada este valor colapsaría, ya no estaría en el rango de velocidad establecida para el funcionamiento correcto del hidrociclón, Se ha presupuestado el costo del equipo del hidrociclón, incluido los materiales de construcción y mano de obra como se aprecia en el anexo 11 en la tabla 11.4, con un costo de 1 800 soles

para una capacidad de 8 L/s de caudal.

5. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga y a la Escuela Profesional de Ciencias Físico Matemáticas.

Asimismo, a la revista Aypate, y de manera muy especial a su Editor en Jefe y a su Comité Editorial, por la oportunidad brindada de difundir nuestros trabajos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Argandoña, L., & Macias, R. (2013). *Determinación de sólidos totales, suspendidos, sedimentados y volátiles, en el efluente de las lagunas de oxidación situadas en la Parroquia Colón, Cantón Portoviejo, Provincia de Manabí, durante el periodo de Marzo a Septiembre 2013*. Manabí, Ecuador: Tesis, Universidad Técnica de Manabí.
- Arismendy, J. (2013). *Evaluación del proceso de clasificación de sólidos en un hidrociclón industrial*. Medellín, Colombia: Tesis, Universidad Pontificia Bolivariana.
- Barboza, G. (2013). Reducción de la carga de contaminantes de las aguas residuales de la planta de tratamiento de Totorá-Ayacucho empleando la técnica de electrocoagulación. Lima, Perú: Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería.
- Barrera, S., Urrutia, C., & Tolvet, C. (2010). *Parámetros de diseño de un hidrociclón*. Santiago de Chile: Trabajo de investigación, Universidad de Chile.
- Cadahía, C. (2005). *Aplicaciones de hidrociclones en fertirrigación*. Madrid, España: Tercera edición.
- Doroteo, E. (2010). *Diseño y operación de un hidrociclón para mejorar la técnica de lavado de suelos*. Coyoacán, México.: Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Kelly, E., & Spottiswood, D. (1990). *Introducción al procesamiento de minerales*. Noriega-Limusa, Mexico.
- Lapeña, M. (1990). *Tratamientos de aguas residuales*. Barcelona, España: Editorial Boixareu. López, S., & Martín, S. (2015). *Depuración de aguas residuales*. Madrid, España: Editorial Elearning S.L, Edición 5.1.
- Matta, R. (2014). *Determinación de gravedad específica de los sólidos*. Arequipa: Universidad Católica de Santa María.
- Medina, J., & Miranda, G. (2007). *Diseño previo a la obtención de filtración de agua de formación de pozos petroleros*. Quito, Ecuador: Universidad Politécnica Nacional.
- Metcalf, & Eddy. (1996). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento y reutilización*. Mexico: McGraw Hill.
- Oloya, R. (2015). *Análisis granulométrico de agregados finos y gruesos*. Trujillo.: Universidad Privada Antenor Orrego.
- Paredes, D. F. (2018). *Diseño de un hidrociclón para clasificación de partículas sólidas de lechado de cal en planta concentradora*. Arequipa: Universidad Nacional de San

Agustín de Arequipa.

Ramalho, R. (1996). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Quebec, Canadá: Editorial Reverté.

Rietema, K., & Verver, C. (1961). *Cyclones in Industry*. New York, EE.UU: Elsevier Publishing Company.

Sainz, J. (2005). *Procesos y operaciones unitarias en depuraciones de aguas residuales*, Madrid, España: 1° Edición.

Segura, J. (2009). *Problemas de procesamiento de minerales*. Trujillo , Perú: 3° Edición.

Solís, L., & Jerónimo, L. (2003). *Principios basicos de la contaminacion ambiental*. Toluca, México: 1° Edición.

Svarovsky, L. (1984). *Hydrocyclones*. Londres: Rinehart and Winston Ltd.