



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Hidrociclón para mejoramiento de plantas
pequeñas para tratamiento de agua
residual**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Civil

P R E S E N T A

Rebeca López Gallegos

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Oscar González Barceló



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

Índice

| | |
|--|----|
| Introducción | 3 |
| I. Objetivos y alcances | 4 |
| I.1 Objetivo general | 4 |
| I.2 Objetivos particulares | 4 |
| I.3 Alcances | 4 |
| II. Marco teórico | 5 |
| II.1 Funcionamiento de Hidrociclón | 13 |
| II.2 Desarenado en planta de tratamiento de agua residual (PTAR)..... | 15 |
| II.3 Proceso anaerobio-aerobio..... | 16 |
| III. Metodología | 20 |
| III.1 Uso del modelo de Plitt | 20 |
| III.2 Dimensionamiento de hidrociclón | 22 |
| IV. Resultados | 23 |
| IV.1 Aplicación de hidrociclón en clasificación de arenas | 23 |
| IV.2 Aplicación de hidrociclón en clasificación de lodo granular | 30 |
| V. Conclusiones | 37 |
| Referencias..... | 38 |

Introducción

La construcción y operación de Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) es una necesidad imperante en nuestro país. La PTAR de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales (FCPyS) recolecta agua residual proveniente de dicha facultad, tienda UNAM y edificios cercanos. La planta está compuesta por un tren de tratamiento anaerobio-aerobio con regulación previa de caudales, en donde la disposición de los tanques, que interfieren para instalación de mejoras, se transforma en área de oportunidad para aplicación de soluciones innovadoras, que se pueden aplicar en el sitio, así como en las PTAR de pequeñas comunidades donde las dimensiones de las plantas representen un obstáculo a las soluciones habituales. Aquí es donde el uso del hidrociclón ofrece soluciones, pues al tratarse de un dispositivo de pequeñas dimensiones representa una oportunidad para realizar un desarenado sin necesidad de un canal desarenador. Además, está documentado que su uso funciona para el mejoramiento del índice volumétrico de lodos (IVL) el cual es un parámetro crítico que clasifica entre buena o pobre sedimentación a los Lodos Activados.

Para aprovechar las áreas de oportunidad y mejorar la planta es necesario tener objetivos bien planteados, también alcances claros y al mismo tiempo visualizar cuáles serían las herramientas disponibles para lograrlo. Aquí se plantea la revisión de bibliografía concerniente a la hidráulica para una mejor comprensión del fenómeno del vórtice, principio con el cual trabaja un hidrociclón. Para las características de sedimentación se recopilan datos de artículos, libros y tesis, y así dar solución a casos prácticos que funcionen como guía para el diseño de hidrociclones con objetivos similares. En capítulo 1 se aborda “Objetivos y alcances”.

En el capítulo 2 “Marco teórico” se expresan las bases documentadas sobre el dispositivo que se propone utilizar para lograr los objetivos; que servirán para llegar a una propuesta de solución sustentada. A partir de esta información de otros autores, en el apartado 3 “Metodología” se presenta una propuesta que permite lograr el diseño de hidrociclones con bases teóricas y empíricas. De esta forma en la presente tesis se desarrolla el diseño del clasificador para el escenario particular de la PTAR de FCPyS con los correspondientes usos que se le dará, ya sea para clasificar arenas o lodo activado de alta densidad, lo cual se describe en la sección 4 “Resultados”.

Finalmente, en el capítulo 5 “Conclusiones” se lograron los diseños de hidrociclones para un desarenador compacto y un seleccionador de lodos activados con mejores características de sedimentación para plantas pequeñas.

I. Objetivos y alcances

I.1 Objetivo general

Para este trabajo se tiene como objetivo diseñar un elemento para clasificar arenas y lodos granulares usando el principio hidráulico del vórtice.

I.2 Objetivos particulares

- a) Diseñar un hidrociclón para arenas con tamaño de partícula mayor que 0.21 mm y densidad relativa de 2.65 permitiendo que sólo pase el material orgánico.
- b) Diseñar un hidrociclón para lodos granulares de reactor discontinuo aerobio considerando que escapen los flóculos y sedimenten los gránulos.

I.3 Alcances

Para el diseño se utilizará bibliografía de hidráulica

Las características de sedimentación de los materiales a separar se recopilarán de tesis, libros y artículos científicos.

El enfoque será de soluciones a casos prácticos para que la tesis sea una guía para el diseño de clasificadores de materiales con un buen funcionamiento hidráulico en tamaños compactos.

II. Marco teórico

En la PTAR de la FCPyS se lleva a cabo un tratamiento anaerobio-aerobio. La combinación de los procesos para el tratamiento de agua residual es una gran oportunidad ya que el gran consumo de energía y producción de lodos residuales resultantes de los procesos aerobios tradicionales puede reducirse entre 60% y 70%, teniendo gran impacto sobre todo en un marco de preservación ecológica y energética (Arvizu, 1996).

Una vista aérea de la PTAR de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales (FCPyS) se muestra en la figura 2.1 y 2.2.



Figura 2.1. Vista aérea de PTAR de FCPyS



Figura 2.2. Vista en isométrico de PTAR de FCPyS

En la figura 2.3 se muestra el diagrama de procesos de la PTAR FCPyS.

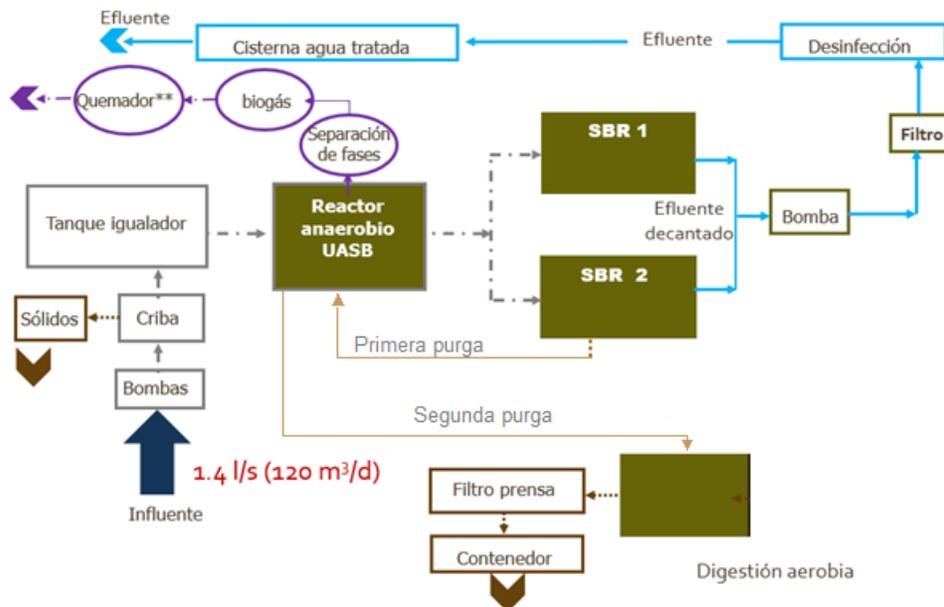


Figura 2.3. Tren de tratamiento de PTAR de FCPyS

El influente a la planta es de aguas residuales mixtas, es decir, de diferentes procedencias, podrían clasificarse como municipales, que se generan durante las labores en la universidad y el uso de muebles sanitarios, e industriales, que proceden de actividades más desarrolladas. Ambas se esperan de los edificios de coordinación de humanidades, tienda UNAM, Universum, entre otros, que dirigen el agua residual a la PTAR de FCPyS. La composición de dichas aguas puede estimarse de la siguiente manera:

Aguas residuales:

- Agua 99.9%
- Sólidos 0.1%
 - Orgánicos 70%
 - Inorgánicos 30%

(López & Martín, 2015)

Además de las aguas mixtas también debe incluir el agua pluvial. Este tipo de aguas son producto del escurrimiento, de las precipitaciones en la zona de estudio, por las diferentes superficies como pueden ser:

- Techos
- Calles
- Jardines
- Avenidas
- Parques

Debido a su procedencia, en su composición suele haber: hollín, polvo de ladrillo y cemento, esporas, polvo orgánico e inorgánico, resto de animales y vegetales, partículas sólidas e hidrocarburos (López & Martín, 2015, p.23).

Por la naturaleza del agua que se recibe en la planta de FCPyS, será necesaria la clasificación de materiales sólido-líquido en diferentes procesos como son: la operación de desarenado y los procesos biológicos, que forman parte del tratamiento secundario, llevado a cabo en los reactores anaerobio-aerobio, para esto se propone un clasificador que funcione por medio del principio del vórtice libre aplicado al dispositivo hidrociclón. Los vórtices aplicados en hidrociclones se aprovechan en los procesos de separación sólido-líquido para tres propósitos principales:

1. El comportamiento de rotación ayuda a minimizar los cortocircuitos y aumentar el tiempo de residencia del fluido.
2. La fuerza centrífuga creada por el movimiento rotacional se puede manipular para extender o acortar el tiempo de residencia de las partículas en el flujo en relación con el tiempo de residencia del fluido.
3. El movimiento de remolino crea una acción de barrido en las superficies normales al eje del vórtice que puede usarse para recolectar material en una ubicación central.

Los separadores de vórtice pertenecen a una categoría de dispositivos usados para extracción mecánica de líquidos con partículas suspendidas como, aguas residuales municipales, pluviales o industriales. Su funcionamiento se basa en la separación por medio de la sedimentación y flotación apoyado por la fuerza centrífuga. La tubería de entrada se instala en una tangente a la pared del tanque para inducir el movimiento circulante del líquido alrededor de un eje vertical, figura 2.4. El líquido que gira genera la fuerza centrífuga que conduce las partículas en suspensión hacia la pared exterior del tanque, por lo tanto, el tiempo de residencia de las partículas dentro del tanque se incrementa aumentando la posibilidad de su eliminación de la corriente líquida (Gonowska-Sznele, 2015).

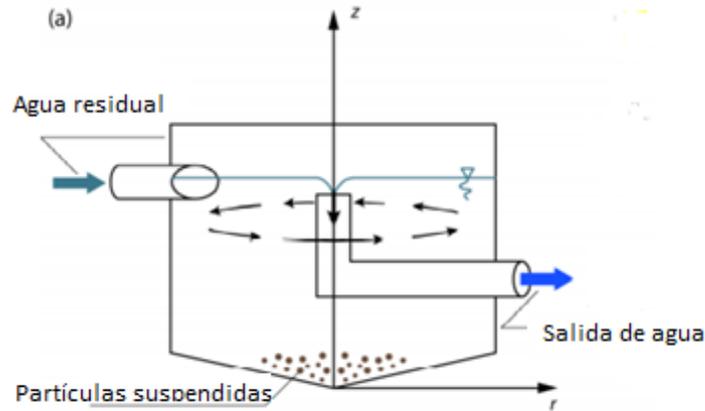


Figura 2.4. Separador de vórtice (Gonowska-Sznele, 2015).

Para describir el comportamiento del flujo en un vórtice se hará uso del Número de Reynolds donde se definirá si se trata de un flujo laminar o turbulento, para así conocer la influencia de la viscosidad en el comportamiento del vórtice. Debido a estas situaciones se definen dos tipos de vórtice, el comportamiento de vórtice forzado y vórtice libre, donde se habla de un flujo rotacional e irrotacional, respectivamente. Se trata de un flujo irrotacional cuando las partículas en un escurrimiento no cambian su orientación respecto a la dirección del flujo durante toda su trayectoria como se muestra en la figura 2.5.a. Para el caso un flujo rotacional, sucede cuando una partícula de fluido se desplaza a lo largo de una trayectoria S y además gira sobre un eje normal a dicha trayectoria, figura 2.5.b.

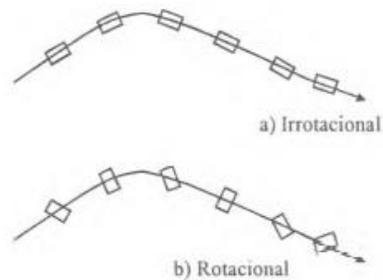


Figura 2.5. Comportamiento de flujo rotacional e irrotacional (Gardea, 2001).

El vórtice forzado es causado por fuerzas externas sobre el fluido, como puede ser, girando un elemento dentro de un recipiente que es cuando el fluido toca una pared rígida en movimiento, por ejemplo, como el que se genera en una taza de café al mover una cuchara, al encontrarse con un agente que lo hace girar aparece una velocidad angular $\Omega = \frac{U_{\theta}}{r}$ en la que U_{θ} es la velocidad tangencial a la trayectoria y r es el radio vector de giro, si se desprecia la fricción puede considerarse que Ω permanecerá constante (Gardea, 2001). Además, el vórtice forzado es definido como la región del campo donde el flujo se comporta como un cuerpo sólido rotacional, esto indica que la viscosidad es significativa en comparación con la fuerza de inercia. Un número de Reynolds bajo indica que existe una viscosidad considerablemente grande que hace que el flujo se comporte más como un sólido; por lo tanto, la velocidad angular se mantiene constante y la velocidad tangencial incrementa linealmente con el radio (Jarman, 2016) figura 2.4

$$U_{\theta} = \Omega r \quad (2.1)$$

Donde:

U_{θ} , es la velocidad tangencial en $\left[\frac{m}{s}\right]$

Ω , es la velocidad angular en $\left[\frac{rad}{s}\right]$

r , es el radio en [m]

El segundo caso se trata del comportamiento de vórtice libre, éste puede ocurrir naturalmente y no se requiere fuerza externa para rotar el fluido, el grado de rotación estará en función de la perturbación inicial, por lo tanto, el vórtice libre sucede cuando el número de Reynolds es alto y la viscosidad es tan pequeña que se vuelve despreciable, entonces, se considera un fluido sin viscosidad (Jarman, 2016). Para que se forme un vórtice libre es necesario que exista un punto de baja presión que succione el flujo hacia él, a este punto se le llama núcleo (Gardea, 2001) figura 2.6.

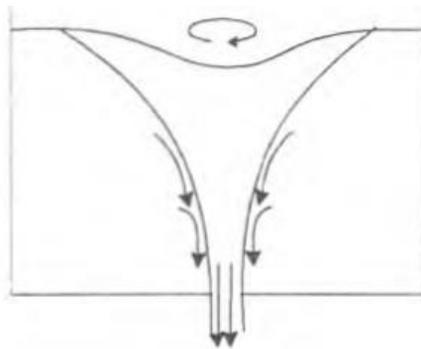


Figura 2.6. Descarga de fondo (Gardea, 2001).

En el vórtice libre el momento angular es constante, en condiciones estables, que de acuerdo con la segunda ley de Newton se expresa de la siguiente manera:

$$F = m a \quad (2.2)$$

Donde:

F , fuerza [N]

m , masa [kg]

a , aceleración $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

Con apoyo en la "Ley de impulso" se tiene la siguiente expresión, donde al adaptarse el momentum al movimiento circular con un radio de giro r se tiene la Ley de impulso angular (Gardea, 2001).

$$F \left[\frac{kgm}{s^2}\right] r [m] dt [s] = m [kg] dU_{\theta} \left[\frac{m}{s}\right] r [m] = m(U_{\theta 2} r_2 - U_{\theta 1} r_1) \quad (2.3)$$

Donde

F , es fuerza en $\left[\frac{kgm}{s^2}\right]$

dt , diferencial de tiempo t en [s]

r , radio que sigue la trayectoria de la partícula en [m]

m , masa de la partícula en [kg]

dU_{θ} , diferencial de la velocidad tangencial donde U_{θ} está en $\left[\frac{m}{s}\right]$

Si se considera que no existe fuerza externa que influya en el flujo y se ignora la fuerza de fricción, efectivamente se trata de un vórtice libre, y el producto de $F*r$ es nulo.

$$mU_{\theta 2} r_2 - mU_{\theta 1} r_1 = 0 \quad (2.4)$$

$$mU_{\theta 1} r_1 = mU_{\theta 2} r_2 = rmU_{\theta} = Cte \quad (2.5)$$

Después de la serie de simplificaciones realizadas se llega a la siguiente expresión, que es la ley del vórtice libre (Gardea, 2001) cuyo comportamiento se muestra en la figura 2.6, en este caso el producto de la velocidad tangencial por el radio se mantiene constante.

$$U_{\theta} r = Cte \quad (2.6)$$

En el caso de un flujo real se observa un tipo de mezcla entre ambos comportamientos. El modelo más completo y simple es el de Rankine, donde se encuentra una mezcla entre vórtice libre y vórtice forzado. El comportamiento de la velocidad tangencial para un vórtice real se presenta en la figura 2.7 (Jarman, 2016). Para lograr una aproximación más cercana al comportamiento real se hará uso de las dos ecuaciones representativas del vórtice forzado y libre respectivamente.

Sustituyendo la ecuación 2.1 en la 2.6

$$U_{\theta} \left(\frac{m}{s} \right) = \Omega \left(\frac{rad}{s} \right) r(m) \quad (2.1)$$

$$U_{\theta} \left(\frac{m}{s} \right) r(m) = Cte \quad (2.6)$$

$$\Omega \left(\frac{rad}{s} \right) r(m) r(m) = Cte \quad (2.7)$$

Como se mencionó anteriormente para el caso de vórtice libre la velocidad tangencial se mantiene constante; por lo tanto, la ecuación 2.8 resulta de la siguiente manera, a la cual se le llamará ecuación de velocidad angular ajustada.

$$\Omega = \frac{cte}{r^2} \quad (2.8)$$

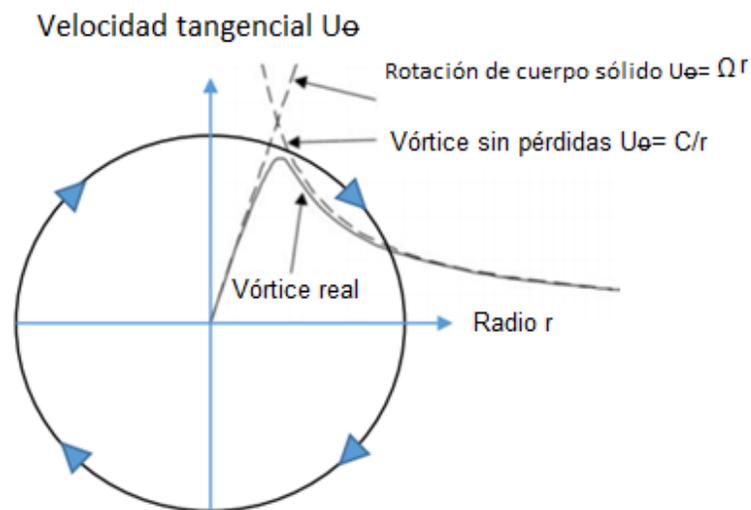


Figura 2.7. Comportamiento real del vórtice (Jarman, 2016)..

Ahora bien, para analizar que el vórtice libre representa un fluido no rotacional se hará uso de la figura 2.8, suponiendo que una partícula P(x,y) está girando con velocidad angular Ω .

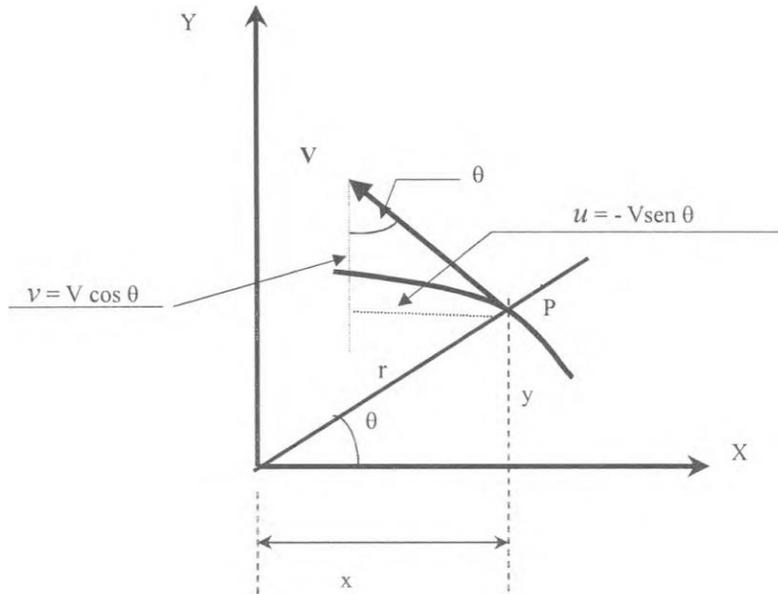


Figura 2.8. Partícula en movimiento (Gardea, 2001)

Donde el $\text{sen}\theta=y/r$ y $\text{cos}\theta=x/r$, el radio también se puede expresar como la raíz de la suma de los catetos al cuadrado, y considerando la ecuación de la velocidad angular ajustada (2.8) se llega a la siguiente expresión vectorial (Gardea, 2001):

$$v = V \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \Omega_z y = C \frac{y}{(\sqrt{x^2 + y^2})^2} = C \frac{y}{x^2 + y^2} \quad (2.9)$$

$$u = -V \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} = -\Omega_z x = -C \frac{x}{(\sqrt{x^2 + y^2})^2} = -C \frac{x}{x^2 + y^2} \quad (2.10)$$

Derivando estas dos expresiones con respecto a las variables x y y, se obtiene:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = -C \frac{x^2 + y^2 - 2y^2}{(x^2 + y^2)^2} = -C \frac{x^2 - y^2}{r^4} = C \frac{y^2 - x^2}{r^4} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = C \frac{x^2 + y^2 - 2x^2}{(x^2 + y^2)^2} = C \frac{y^2 - x^2}{r^4} \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad (2.13)$$

Se concluye que el rotacional es nulo, por lo tanto, se trata de un vórtice libre donde las partículas se desplazan en trayectorias curvas y no con respecto a un eje perpendicular a la trayectoria, manteniendo siempre su posición con respecto a la línea que describe su movimiento (Gardea, 2001).

II.1 Funcionamiento de Hidrociclón

Se propone usar un dispositivo clasificador por vórtice, también llamado hidrociclón, que servirá para crear un nuevo campo gravitacional centrífugo alrededor del ciclón y así las partículas tengan una aceleración axial. El hidrociclón funcionará con el principio del vórtice libre, debido a que, en la entrada de la pulpa, que es la mezcla de los sólidos con el agua, habrá una presión ejercida en la sección transversal del tubo de alimentación, el cual estará unido tangencialmente a la sección cilíndrica. Debido a que el hidrociclón consigue una clasificación de masas, no de tamaños, la gravedad específica de la partícula es de suma importancia (Pedraza, 2018). De acuerdo con la proximidad de las partículas de mayor densidad con la salida inferior se generará una obstrucción en la zona, generando una pérdida de carga importante mientras que en la salida superior la pérdida de carga es menor, y con eso se genera un segundo vórtice por el cual asciende parte del fluido y las partículas menos densas, generando dos vórtices dentro del cuerpo del hidrociclón (Güenchea, 2015) figura 2.9.

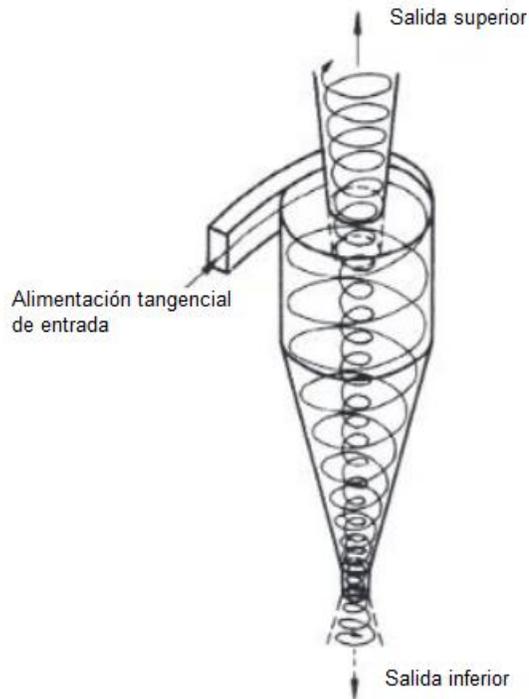


Figura 2.9. Dos vórtices generados en hidrociclón (Güenchea, 2015)

A continuación, se muestra el artefacto clasificador y sus componentes en la figura 2.10



Figura 2.10. Clasificador por vórtice, Hidrociclón (Partin,2019)

De acuerdo con la figura anterior se pueden describir los componentes más importantes de un hidrociclón:

- La alimentación tangencial de entrada, en esta parte se controla la entrada de la pulpa y tiene la finalidad de orientar al fluido para que entre en contacto con las paredes del hidrociclón.
- Buscador del vórtice, esta parte debe ser estrictamente cilíndrica ya que se busca una estabilización de movimiento de las partículas.
- Extensión del cuerpo y cuerpo cónico, en estos se busca controlar el movimiento para lograr la formación de los vórtices deseados.
- Salida superior, es una parte importante del hidrociclón por aquí se busca captar un derrame fino con baja concentración de sólidos.
- Salida inferior, por esta salida se descargarán los sólidos gruesos, así que debe tener un tamaño adecuado para que permita su correcta salida.

Asimismo, se trabaja con diferentes parámetros y nomenclaturas que intervienen en el funcionamiento del hidrociclón, figura 2.11, como son:

- i. Parámetros geométricos
 - Diámetro de Hidrociclón, D_c
 - Diámetro de conducto de salida inferior, D_u
 - Diámetro de entrada, D_i
 - Diámetro de conducto de salida superior, D_o
 - Ángulo del cono θ
- ii. Condiciones operativas
 - Flujo Q de pulpa en la entrada
 - Porcentaje de sólidos (V) a la entrada, $\%V/V_{\text{entrada}}$

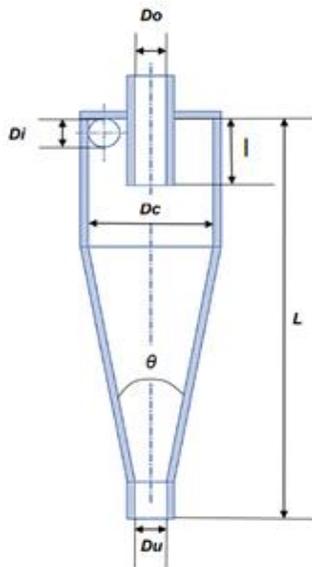


Figura 2.11: Variables en hidrociclones (Yamit, 2018)

II.2 Desarenado en planta de tratamiento de agua residual (PTAR)

Las arenas son un problema en las Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR), ya que provocan desgaste en los equipos mecánicos, disminuye el volumen de tratamiento efectivo en los tanques, causan obstrucciones en tuberías y, en general, aumenta los costos operativos (Meunier, 2015). Debido a la naturaleza del agua que se recibe en la planta de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales (FCPyS), como parte de un pretratamiento para eliminar las arenas presentes y para evitar

que en el tanque regulador se requiera un desazolve frecuente se propone el uso de un hidrociclón entre el cárcamo de agua cruda y el tanque regulador. Este dispositivo busca que las arenas sean retenidas en el fondo, debido a su densidad, y la materia orgánica se mantengan a flote y se descarguen listas para recibir el siguiente tratamiento. Con esta operación se pretende separar las partículas inorgánicas, con una densidad específica de 2.65 y un tamaño mayor o igual a 0.21 mm, del material orgánico.

Existen diferentes tipos de desarenadores, con el área circular se tienen:

- De separación centrífuga: La circulación del fluido es inducida por el movimiento rotatorio en la cámara.
- De separación rotacional: Ciclones donde el fluido portador es el aire; hidrociclones, cuyo fluido portador es el agua y; finalmente el desarenador de vórtice, del cual el fluido portador es agua, donde la circulación del fluido es inducida por la posición de entrada del influente o barras de guía en una cámara fija (Gronowska, 2015, p.34)

Se considerará que la temperatura del agua es de 20°C, para los sólidos de alimentación la gravedad específica será de 2.65 (Arteburn, 1976). Ahora, para el caso de agua a 20°C se tiene el valor de la densidad del agua de 998.2 kg/m³ (UNCUYO, 2012).

II.3 Proceso anaerobio-aerobio

Como parte de un tratamiento secundario, en la PTAR de FCPyS, se lleva a cabo un proceso anaerobio-aerobio en los respectivos reactores. El proceso anaerobio se realiza en el Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB por sus siglas en inglés), en este reactor la principal característica es la formación de un manto de lodos (microorganismos anaerobios) floculento o granular con buena capacidad de sedimentación (Lorenzo et al, 2006), ahí se llevará a cabo la actividad biológica ya que entra en contacto con el efluente y se efectúa la degradación de compuestos complejos por medio de una serie de etapas como son: hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis (MAPAS, libro 49). Para que el reactor tenga una buena eficiencia es indispensable que se tenga un lodo granulado de buenas características con una actividad biológica elevada, lo cual depende de la cantidad de microorganismos presentes en el lodo, los cuales son responsables de la degradación de la materia orgánica presente en el agua residual, esto también dependerá de los siguientes factores:

- Disponibilidad de nutrientes
- Temperatura
- Tipo de residuos
- pH
- Sedimentación por gravedad

El lodo con elevada actividad biológica se obtiene después de un largo tiempo de adaptación debido a que las bacterias anaerobias tienen una baja velocidad de crecimiento (Lorenzo et al, 2006). Una vez que se inicia la operación del reactor hasta que se alcanza la estabilidad del proceso la tarea primordial será la retención de la biomasa viable dentro del reactor, que es la materia orgánica

originada en un proceso biológico utilizable como fuente de energía, y su acumulación posterior, este aspecto tiene mucha relación con la formación de gránulos con tamaños ideales entre 1 y 3 mm (MAPAS, libro49). Estos gránulos presentes en el lodo granular deberán tener un Índice Volumétrico de Lodos (IVL) de 10 a 20 mL/g y esto ocurre en la parte inferior del lecho de lodos (Lorenzo et al, 2006) el IVL es un indicador de control que sirve para medir las características de sedimentabilidad del lodo del cual se describirá más adelante. En este reactor la purga de lodos se realizará con poca frecuencia ya que se requiere un largo tiempo para la formación de lodos adecuados para el proceso; sin embargo, se propone el uso de un dispositivo hidrociclón para rescatar los gránulos de 1 a 3 mm que se encuentren en la salida del reactor y reinyectarlos al reactor para que la biomasa presente en el manto de lodos no disminuya con el tiempo.

Seguido del proceso anaerobio se encuentra el proceso aerobio que se lleva a cabo en el Reactor Secuencial Discontinuo (SBR por sus siglas en inglés). Un reactor secuencial discontinuo es un sistema de tratamiento de lodos activados que se basa en una secuencia de ciclos de llenado y vaciado. El proceso de lodos activados está formado por microorganismos que se conglomeran y forman gránulos y flóculos bacterianos. Durante la operación de las PTAR la correcta supervisión del proceso de tratamiento es indispensable, se espera que la producción de agua tratada tenga la calidad de las especificaciones y la normatividad lo cual se logra por medio de indicadores de control, donde los más utilizados son:

- Índice volumétrico de lodos (IVL)
- Relación alimento/microorganismos (A/M)
- Tiempo de retención medio celular (TRMC)
- Recirculación de lodos
- Purga de lodos

(MAPAS, N°51).

Ahora, el índice volumétrico de lodos se define como el volumen en mililitros que ocupa 1 gramo de sólidos en suspensión, en peso seco, medido en una probeta después de 30 minutos de dejar en reposo y esperar a que los sólidos sedimenten. Para lodos de buenas características los valores típicos se encuentran en el intervalo de 150 a 35, con concentraciones de 800 a 3500 mg/ litro (MAPAS N°51). La información que arroja esta prueba sirve para conocer el comportamiento del sistema y diagnosticar posibles problemas en la operación. La baja capacidad de sedimentación del lodo activado puede conducir al deterioro de la calidad del efluente debido a la pérdida excesiva del lodo activado y el envejecimiento descontrolado del mismo; así como una baja eficiencia en el tratamiento (Nancharaiah y Kiran, 2017).

Si se grafican los datos de volumen de lodo con respecto al tiempo, figura 2.12, se obtiene la siguiente relación de curvas:

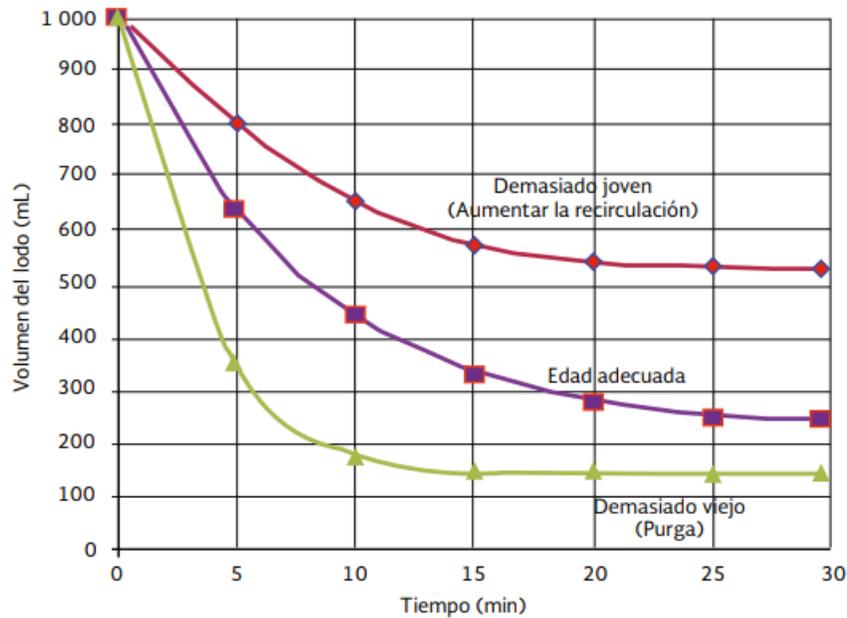


Figura 2.12 Curva de sedimentación (MAPAS, N°51).

Donde:

Línea roja; se trata de un lodo esponjoso, de color café y posiblemente sea un lodo joven

Línea violeta; corresponde a un lodo maduro, de flóculo bien formado con color café chocolate y olor a tierra húmeda

La línea verde, representa un lodo viejo con características de excelente sedimentabilidad pero con un clarificado turbio, el lodo es color café oscuro

Cuando en el reactor secuencial discontinuo (SBR) se encuentra una acumulación de lodos activados la función del hidrociclón será utilizar las fuerzas centrifugas para retener agregados microbianos más densos en el sistema, de tal forma que por la salida superior ocurra el desbordamiento de la biomasa flocular y en la salida inferior se capte el flujo enriquecido en gránulos y se recicle al reactor (Shi et al., 2016) de esta manera se procurará que el índice volumétrico de lodos (IVL) se mantenga dentro de los límites óptimos para el buen funcionamiento del reactor. Según el trabajo de Shi et al. (2016), los hidrociclones son concentradores efectivos de gránulos en sistemas con procesos de lodos activados. Para mantener la uniformidad del lodo granular en los reactores, una parte del lodo se intercambia periódicamente (Kent et al., 2018).

Ahora, un sistema de lodos activados funciona con gránulos aerobios que son células microbianas unidas célula a célula, cuyas características son: poseer un asentamiento rápido; estructura compacta, definida y redonda; además de ser biológicamente activo. En la tabla 2.1 se muestran características del lodo activado con formación de flóculos y del lodo granular aerobio, es decir, con gránulos bien

formados según Nancharaiah y Kiran, 2017 que servirán para el diseño del hidrociclón que se usará en esta sección correspondiente al reactor SBR de lodos activados.

| Parámetro | Lodo activado | Lodo granular aerobio | Observaciones |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|--|
| Forma y tamaño medio | Irregular < 0.2 mm | Esférica ➤ 0.2 mm | El tamaño y densidad de los gránulos favorecen la sedimentación |
| Gravedad específica | 0.997 – 1.010 | 1.010 – 1.017 | El dato correspondiente al lodo granular aerobio favorece la separación sólido-líquido |
| Velocidad específica | < 10 m/h | > 10 m/h | Los gránulos pueden sedimentar a mayor velocidad sin ayuda de fuerzas externas |
| IVL | $IVL_5 \neq IVL_{30}$ | $IVL_5 = IVL_{30}$ | El caso de gránulos aerobios tiene capacidades superiores de sedimentación |

Tabla 2.1 Características de lodo activado y lodo granular aerobio (Nancharaiah y Kiran, 2017).

III. Metodología

III.1 Uso del modelo de Plitt

Se hará uso del modelo de Plitt (1976), que es de los más utilizados para el dimensionamiento de hidrociclones, el cual se obtuvo por medio del desarrollo de un modelo empírico basado en datos experimentales colectados por él mismo, este modelo puede ser aplicado en diferentes procesos de clasificación de partículas como en la industria minera, petrolera, etc. Por medio de este modelo se puede conocer el tamaño o diámetro de partícula con probabilidad de separación del 50% conocido como d_{50} .

$$d_{50} = \frac{K Dc^{0.46} Di^{0.6} Do^{1.21} e^{0.0635v}}{Du^{0.71} h^{0.38} Q^{0.45} (\rho_s - \rho_l)^{0.5}} \quad (3.1)$$

Donde:

| | |
|----------|---|
| d_{50} | Tamaño de corte (um) |
| Dc | Diámetro de Hidrociclón (in) |
| Di | Diámetro de entrada (in) |
| Do | Diámetro de conducto de salida superior (in) |
| Du | Diámetro de conducto de salida inferior (in) |
| h | Altura de hidrociclón (in) |
| Q | Caudal en la entrada (ft ³ /min) |
| K | Constante |
| v | Concentración, como sólidos sedimentables (v/v) |
| ρ_s | Densidad de sólidos (lb/in ³) |
| ρ_l | Densidad de fluido (lb/in ³) |

Debido a que se desea diseñar un hidrociclón por medio de la ecuación de Plitt el diámetro medio d_m será la medida que limitará el paso hacia la zona de finos y gruesos; por lo tanto, el d_{50} debe ser menor al diámetro medio d_m para obtener una eficiencia mayor al 50%. Para mejorar la eficiencia de operación el d_{50} debe ser $0.74d_m$, esto resulta en que el d_m corresponderá con el diámetro de partícula con un 80% de probabilidad de separación (Ortiz, 2015).

El modelo de Plitt ha sido utilizado y analizado por varios autores que han logrado realizar algunas adecuaciones a la constante K que se muestra en la ecuación 3.1. Esta constante se obtiene por medio de experimentos para cada caso específico. El modelo que se utilizará en los casos de aplicación de esta tesis será aquel donde la constante K se adecúa mejor para la clasificación de lodos y es propuesto por Luz (2005) en la ecuación 3.2.

$$d_{50} = \frac{52.45 D_c^{0.46} D_i^{0.6} D_o^{1.21} e^{0.063v}}{Du^{0.71} h^{0.38} Q^{0.45} (\rho_s - \rho_l)^{0.5}} \quad (3.2)$$

Con la ecuación modificada de Plitt que propone Luz (2015), ecuación (3.2) se tienen las bases para realizar el dimensionamiento del hidrociclón, en el cual se ven presentes los parámetros geométricos y las condiciones operativas del dispositivo que se muestran a continuación:

iii. Parámetros geométricos

- Diámetro de Hidrociclón, D_c
- Diámetro de conducto de salida inferior, D_u
- Diámetro de entrada, D_i
- Diámetro de conducto de salida superior, D_o
- Ángulo del cono θ

iv. Condiciones operativas

- Flujo de pulpa en la entrada Q
- Porcentaje de sólidos (V) a la entrada, $\%V/V_{entrada}$

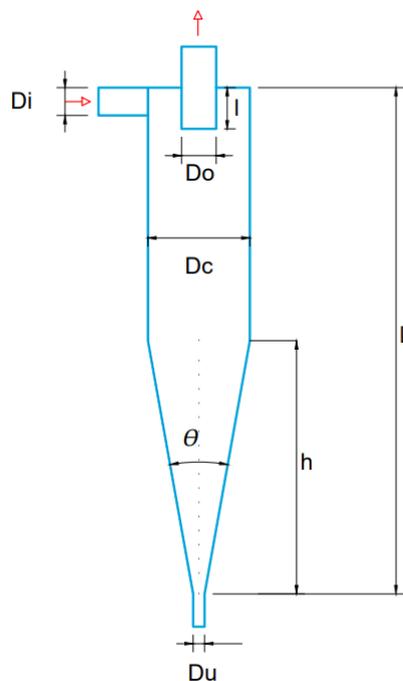


Figura 3.1. Variables en hidrociclones (adaptación de figura 2.11)

III.2 Dimensionamiento de hidrociclón

Para realizar el dimensionamiento del dispositivo se necesita reducir el número de variables involucradas en el modelo de Luz y así tener una ecuación con solución. Para esto se revisó el trabajo de Rietema, que con base en estudios y actualizaciones sobre la geometría de los hidrociclones, basándose en el tiempo de estancia de las partículas en el dispositivo (Davailles, 2011), propone unas relaciones geométricas en función del diámetro del hidrociclón que recomienda para garantizar la mejor separación posible. De la misma manera Krebs y Bradley proponen unas relaciones diferentes para constituir la geometría de un hidrociclón, a lo que de acuerdo con Silva (2013) se puede llamar las tres familias principales de hidrociclones cuyos valores se muestran en la tabla 3.1

| | $\frac{D_i}{D_c}$ | $\frac{D_o}{D_c}$ | $\frac{L}{D_c}$ | $\frac{l}{D_c}$ | θ |
|----------------|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|----------|
| Rietema | 0.28 | 0.34 | 5 | 0.4 | 15°-20° |
| Krebs | 0.267 | 0.159 | 5.874 | | 12.7° |
| Bradley | 0.133 | 0.2 | 6.85 | 0.33 | 9° |

Tabla 3.1: Tres familias principales de hidrociclones (Silva, 2013)

Ahora bien, se realizará la sustitución de cada propuesta de las familias de hidrociclones en la ecuación de Plitt modificada por Luz, para reducir las variables involucradas. En la siguiente ecuación se muestra la sustitución de los parámetros geométricos propuestos por Rietema:

$$d_{50} = \frac{52.45 D_c^{0.46} (0.28 D_c)^{0.6} (0.34 D_c)^{1.21} e^{0.063v}}{D_u^{0.71} h^{0.38} Q^{0.45} (\rho_s - \rho_l)^{0.5}} \quad (3.3)$$

Donde el diámetro de la salida inferior (D_u) y la altura (h) también se tendrán en función de D_c según el caso de aplicación, de esta manera conociendo el tamaño de corte (d_{50}) y el diámetro medio (d_m) se podrá resolver la ecuación y así obtener el diámetro del hidrociclón (D_c) y los demás parámetros geométricos. En consecuencia, como resultado se tiene el dimensionamiento conveniente para cada hidrociclón según lo establezcan las condiciones operativas de cada material que se necesite clasificar.

IV. Resultados

IV.1 Aplicación de hidrociclón en clasificación de arenas

Para la PTAR de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, se tienen condiciones operativas específicas, donde, según el trabajo de tesina de Gonzalez, 2013; el caudal medio en días de operación normal asciende a 1.5 lps, este será el gasto que se usará para dimensionar el desarenador. Por otro lado, también se trabajará con una concentración volumétrica de sólidos en el agua residual de 15 ml/L que se lee de cono Imhoff, dando como resultado las siguientes condiciones operativas:

$$Q = 1.5 \frac{l}{s} = 3.178 \frac{ft^3}{min} \quad (4.1)$$

$$v = 15 \frac{ml}{L} \quad (4.2)$$

$$\% \frac{V}{V} = 15 \frac{ml}{1000ml} * 100 = 1.5\% \quad (4.3)$$

Posteriormente, queda definir el diámetro medio (d_m), la masa específica del fluido y de los sólidos, cuyos valores son 0.21mm, 998.2 kg/m³ y 2650 kg/m³, respectivamente. Ahora, se realizan las conversiones de unidades necesarias para ser compatible con la ecuación de Plitt modificada por Luz.

$$d_m = 0.21mm \left(\frac{1000 \mu m}{1 mm} \right) = 210 \mu m \quad (4.4)$$

$$d_{50} = 0.21mm * 0.74 * \left(\frac{1000 \mu m}{1 mm} \right) = 155.4 \mu m \quad (4.5)$$

$$\rho_l = 998.2 \frac{kg}{m^3} \left(\frac{1lb}{0.4536kg} \right) \left(\frac{1m^3}{61023.7in^3} \right) = 0.036 \frac{lb}{in^3} \quad (4.6)$$

$$\rho_s = 2650 \frac{kg}{m^3} \left(\frac{1lb}{0.4536kg} \right) \left(\frac{1m^3}{61023.7in^3} \right) = 0.0957 \frac{lb}{in^3} \quad (4.7)$$

Sustituyendo valores en la ecuación de Plitt modificada por Luz con los parámetros geométricos que propone Rietema y una propuesta de relación $Du = 0.12 * Dc$ y $h = 2.5 * Dc$

$$155.4 \mu m = \frac{52.45 Dc^{0.46} (0.28 Dc)^{0.6} (0.34 Dc)^{1.21} e^{0.063(1)}}{(0.12 Dc)^{0.71} (2.5 Dc)^{0.38} 3.178 \frac{ft^3}{min}^{0.45} (0.0957 \frac{lb}{in^3} - 0.036 \frac{lb}{in^3})^{0.5}} \quad (4.8)$$

- Resolviendo la ecuación resulta: $D_c=2.36$ in; equivalente a $D_c=6$ cm.

Las relaciones geométricas más extremas de las tres principales familias de hidrociclones son las de los autores Rietema y Bradley, por lo tanto, con base en ellas se realizaron ensayos de hidrociclones variando los factores que afectan a D_u y h que son variables que intervienen en el denominador de la ecuación de Plitt modificada por Luz, una vez elaborados los diferentes ensayos, que se muestran en la figura 4.1, se ha hecho la conversión de unidades de pulgada (in) a centímetros (cm) y se muestra en la tabla 4.1, resumen de los ensayos, donde se ha coloreado la celda de rojo que cumple el ángulo recomendado, de esa serie de ensayos que cumplen se procede a seleccionar el dispositivo que muestra las mejores características geométricas.

| N° ensayo | | cm | | | | | | | | Grados |
|-----------|---------|----------|-------|-------|-------|-------|------|-----|-------|----------|
| | | d_{50} | D_c | D_i | D_o | D_u | h | l | L | θ |
| 1 | Rietema | 0.01554 | 6.0 | 1.7 | 2.0 | 0.7 | 15.0 | 2.4 | 30.0 | 19.4 |
| 1 | Bradley | 0.01554 | 14.0 | 1.9 | 2.8 | 1.8 | 23.6 | 4.6 | 95.6 | 27.2 |
| 2 | Rietema | 0.01554 | 8.0 | 2.2 | 2.7 | 1.4 | 23.3 | 3.2 | 40.2 | 15.8 |
| 2 | Bradley | 0.01554 | 12.6 | 1.7 | 2.5 | 1.3 | 25.2 | 4.2 | 86.2 | 24.2 |
| 3 | Rietema | 0.01554 | 8.2 | 2.3 | 2.8 | 1.6 | 20.4 | 3.3 | 40.8 | 17.7 |
| 3 | Bradley | 0.01554 | 14.2 | 1.9 | 2.8 | 1.7 | 28.4 | 4.7 | 97.1 | 23.7 |
| 4 | Rietema | 0.01554 | 9.1 | 2.5 | 3.1 | 2.3 | 20.9 | 3.6 | 45.4 | 18.1 |
| 4 | Bradley | 0.01554 | 18.8 | 2.5 | 3.8 | 3.1 | 51.4 | 6.2 | 128.9 | 17.0 |
| 5 | Rietema | 0.01554 | 11.0 | 3.1 | 3.8 | 3.3 | 33.1 | 4.4 | 55.2 | 13.1 |
| 5 | Bradley | 0.01554 | 24.6 | 3.3 | 4.9 | 6.6 | 61.5 | 8.1 | 168.5 | 16.3 |

Tabla 4.1 Resumen de ensayos para dimensionamiento de hidrociclón

| Rietema Ensayo 1 | | | | | |
|------------------|----------------------|--------|-------|--------|--------|
| | Unidades | factor | | exp | |
| cte | adim | 1 | 52.45 | 1 | d50 |
| Dc | in | 1 | 2.36 | 0.46 | |
| Di | in | 0.28 | 0.66 | 0.6 | |
| D0 | in | 0.34 | 0.80 | 1.21 | |
| e | adim | 1 | 2.72 | 0.0945 | |
| v | adim | 1 | 1.50 | 1 | |
| Du | in | 0.12 | 0.28 | 0.71 | |
| h | in | 2.5 | 5.91 | 0.38 | |
| Q | ft ³ /min | 1 | 3.18 | 0.45 | |
| ps-pl | lb/in ³ | 1 | 0.06 | 0.5 | |
| | | | | | 155.40 |
| | | | | | 0.00 |

| Rietema Ensayo 2 | | | | | |
|------------------|----------------------|--------|-------|------|--------|
| | Unidades | factor | | exp | |
| cte | adim | 1 | 52.45 | 1 | d50 |
| Dc | in | 1 | 3.16 | 0.46 | |
| Di | in | 0.28 | 0.89 | 0.6 | |
| D0 | in | 0.34 | 1.08 | 1.21 | |
| e | adim | 1 | 2.72 | 0.09 | |
| v | adim | 1 | 1.50 | 1 | |
| Du | in | 0.18 | 0.57 | 0.71 | |
| h | in | 2.9 | 9.17 | 0.38 | |
| Q | ft ³ /min | 1 | 3.18 | 0.45 | |
| ps-pl | lb/in ³ | 1 | 0.06 | 0.5 | |
| | | | | | 155.40 |
| | | | | | 0.00 |

| Rietema Ensayo 3 | | | | | |
|------------------|----------------------|--------|-------|------|--------|
| | Unidades | factor | | exp | |
| cte | adim | 1 | 52.45 | 1 | d50 |
| Dc | in | 1 | 3.21 | 0.46 | |
| Di | in | 0.28 | 0.90 | 0.6 | |
| D0 | in | 0.34 | 1.09 | 1.21 | |
| e | adim | 1 | 2.72 | 0.09 | |
| v | adim | 1 | 1.50 | 1 | |
| Du | in | 0.2 | 0.64 | 0.71 | |
| h | in | 2.5 | 8.03 | 0.38 | |
| Q | ft ³ /min | 1 | 3.18 | 0.45 | |
| ps-pl | lb/in ³ | 1 | 0.06 | 0.5 | |
| | | | | | 155.40 |
| | | | | | 0.00 |

| Rietema Ensayo 4 | | | | | |
|------------------|----------------------|--------|-------|--------|--------|
| | Unidades | factor | | exp | |
| cte | adim | 1 | 52.45 | 1 | d50 |
| Dc | in | 1 | 3.58 | 0.46 | |
| Di | in | 0.28 | 1.00 | 0.6 | |
| D0 | in | 0.34 | 1.22 | 1.21 | |
| e | adim | 1 | 2.72 | 0.0945 | |
| v | adim | 1 | 1.50 | 1 | |
| Du | in | 0.25 | 0.89 | 0.71 | |
| h | in | 2.3 | 8.23 | 0.38 | |
| Q | ft ³ /min | 1 | 3.18 | 0.45 | |
| ps-pl | lb/in ³ | 1 | 0.06 | 0.5 | |
| | | | | | 155.40 |
| | | | | | 0.00 |

| Rietema Ensayo 5 | | | | | |
|------------------|----------------------|--------|-------|--------|--------|
| | Unidades | factor | | exp | |
| cte | adim | 1 | 52.45 | 1 | d50 |
| Dc | in | 1 | 4.35 | 0.46 | |
| Di | in | 0.28 | 1.22 | 0.6 | |
| D0 | in | 0.34 | 1.48 | 1.21 | |
| e | adim | 1 | 2.72 | 0.0945 | |
| v | adim | 1 | 1.50 | 1 | |
| Du | in | 0.3 | 1.30 | 0.71 | |
| h | in | 3 | 13.05 | 0.38 | |
| Q | ft ³ /min | 1 | 3.18 | 0.45 | |
| ps-pl | lb/in ³ | 1 | 0.06 | 0.5 | |
| | | | | | 155.40 |
| | | | | | 0.00 |

| Bradley Ensayo 1 | | | | | |
|------------------|----------------------|--------|-------|------|--------|
| | Unidades | factor | | exp | |
| cte | adim | 1 | 52.45 | 1 | d50 |
| Dc | in | 1 | 5.49 | 0.46 | |
| Di | in | 0.1333 | 0.73 | 0.6 | |
| D0 | in | 0.2 | 1.10 | 1.21 | |
| e | adim | 1 | 2.72 | 0.09 | |
| v | adim | 1 | 1.50 | 1 | |
| Du | in | 0.13 | 0.71 | 0.71 | |
| h | in | 1.69 | 9.28 | 0.38 | |
| Q | ft ³ /min | 1 | 3.18 | 0.45 | |
| ps-pl | lb/in ³ | 1 | 0.06 | 0.5 | |
| | | | | | 155.40 |
| | | | | | 0.00 |

| Bradley Ensayo 2 | | | | | |
|------------------|----------------------|--------|-------|------|--------|
| | Unidades | factor | | exp | |
| cte | adim | 1 | 52.45 | 1 | d50 |
| Dc | in | 1 | 4.95 | 0.46 | |
| Di | in | 0.1333 | 0.66 | 0.6 | |
| D0 | in | 0.2 | 0.99 | 1.21 | |
| e | adim | 1 | 2.72 | 0.09 | |
| v | adim | 1 | 1.50 | 1 | |
| Du | in | 0.1 | 0.50 | 0.71 | |
| h | in | 2 | 9.90 | 0.38 | |
| Q | ft ³ /min | 1 | 3.18 | 0.45 | |
| ps-pl | lb/in ³ | 1 | 0.06 | 0.5 | |
| | | | | | 155.40 |
| | | | | | 0.00 |

| Bradley Ensayo 3 | | | | | |
|------------------|----------------------|--------|-------|--------|--------|
| | Unidades | factor | | exp | |
| cte | adim | 1 | 52.45 | 1 | d50 |
| Dc | in | 1 | 5.58 | 0.46 | |
| Di | in | 0.133 | 0.74 | 0.6 | |
| D0 | in | 0.2 | 1.12 | 1.21 | |
| e | adim | 1 | 2.72 | 0.0945 | |
| v | adim | 1 | 1.50 | 1 | |
| Du | in | 0.122 | 0.68 | 0.71 | |
| h | in | 2 | 11.16 | 0.38 | |
| Q | ft ³ /min | 1 | 3.18 | 0.45 | |
| ps-pl | lb/in ³ | 1 | 0.06 | 0.5 | |
| | | | | | 155.40 |
| | | | | | 0.00 |

| Bradley Ensayo 4 | | | | | |
|------------------|----------------------|--------|-------|------|--------|
| | Unidades | factor | | exp | |
| cte | adim | 1 | 52.45 | 1 | d50 |
| Dc | in | 1 | 7.41 | 0.46 | |
| Di | in | 0.133 | 0.99 | 0.6 | |
| D0 | in | 0.2 | 1.48 | 1.21 | |
| e | adim | 1 | 2.72 | 0.09 | |
| v | adim | 1 | 1.50 | 1 | |
| Du | in | 0.165 | 1.22 | 0.71 | |
| h | in | 2.73 | 20.22 | 0.38 | |
| Q | ft ³ /min | 1 | 3.18 | 0.45 | |
| ps-pl | lb/in ³ | 1 | 0.06 | 0.5 | |
| | | | | | 155.40 |
| | | | | | 0.00 |

| Bradley Ensayo 5 | | | | | |
|------------------|----------------------|--------|-------|------|--------|
| | Unidades | factor | | exp | |
| cte | adim | 1 | 52.45 | 1 | d50 |
| Dc | in | 1 | 9.68 | 0.46 | |
| Di | in | 0.133 | 1.29 | 0.6 | |
| D0 | in | 0.2 | 1.94 | 1.21 | |
| e | adim | 1 | 2.72 | 0.09 | |
| v | adim | 1 | 1.50 | 1 | |
| Du | in | 0.27 | 2.61 | 0.71 | |
| h | in | 2.5 | 24.21 | 0.38 | |
| Q | ft ³ /min | 1 | 3.18 | 0.45 | |
| ps-pl | lb/in ³ | 1 | 0.06 | 0.5 | |
| | | | | | 155.40 |
| | | | | | 0.00 |

Figura 4.1 ensayos para dimensionamiento de hidrociclón

Una vez analizado la tabla resumen se observa que los ensayos 3 y 4 de Rietema muestran las mejores características geométricas; y de estos, se selecciona el hidrociclón que corresponde al ensayo 3 ya que resulta más compacto. En la figura 4.2 se presenta el descriptivo de cómo se soluciona el ensayo seleccionado de figura 4.1 y tabla 4.1 mediante la herramienta SMATH Solver. Finalmente, en la figura 4.3 se presenta un corte del hidrociclón seleccionado para separar las arenas.

Rietema ensayo 3

$$d_{50} := 155.4 \quad \mu\text{m}$$

$$D_c := 3.213 \quad \text{in}$$

Factores en denominador

$$x := 0.2$$

$$y := 2.5$$

Ecuación de Plitt

$$\frac{52.45 \cdot D_c^{0.46} \cdot (0.28 \cdot D_c)^{0.6} \cdot (0.34 \cdot D_c)^{1.21} \cdot e^{0.063 \cdot 1.5}}{(x \cdot D_c)^{0.71} \cdot (y \cdot D_c)^{0.38} \cdot 3.178^{0.45} \cdot (0.0957 - 0.036)^{0.5}} = 155.39$$

$$D_u := D_c \cdot x \cdot 2.54 = 1.6322 \quad \text{cm}$$

$$h := D_c \cdot y \cdot 2.54 = 20.4026 \quad \text{cm}$$

$$D_c' := D_c \cdot 2.54 = 8.161 \quad \text{cm}$$

$$z := \frac{D_c' - D_u}{h} \cdot 2 = 0.32$$

$$\frac{\text{atan}(z)}{\pi} \cdot 180 = 17.7447 \quad \theta$$

Figura 4.2 Ensayo 3 resuelto por SMATH Solver

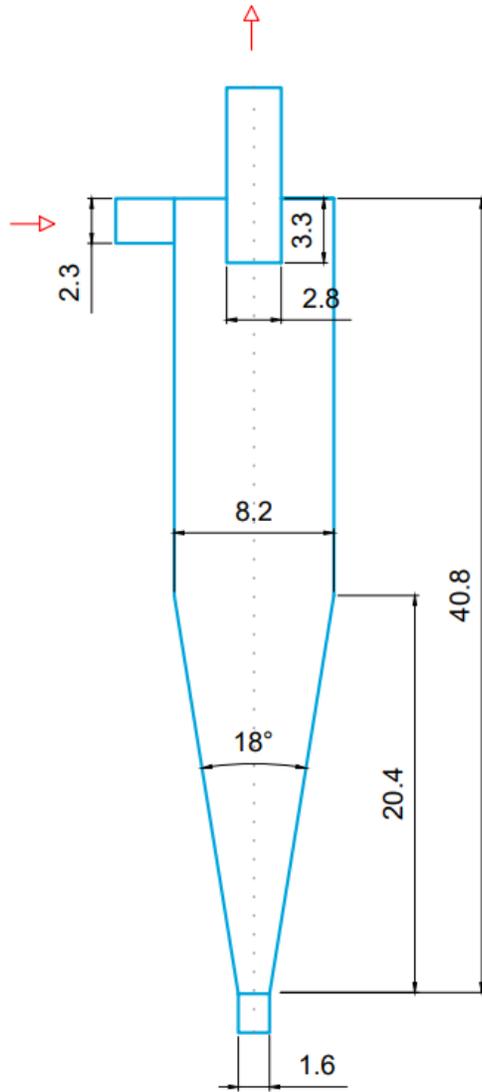


Figura 4.3 Dimensionamiento de hidrociclón para clasificación de arenas (acotaciones en cm)

El hidrociclón clasificador de arenas, será instalado después del cárcamo de agua cruda cuya agua es bombeada hacia tanque regulador, como se muestra en la figura 4.4, justo donde llega el agua del bombeo y se realizan aforos para medir el caudal en diferentes condiciones de operación.

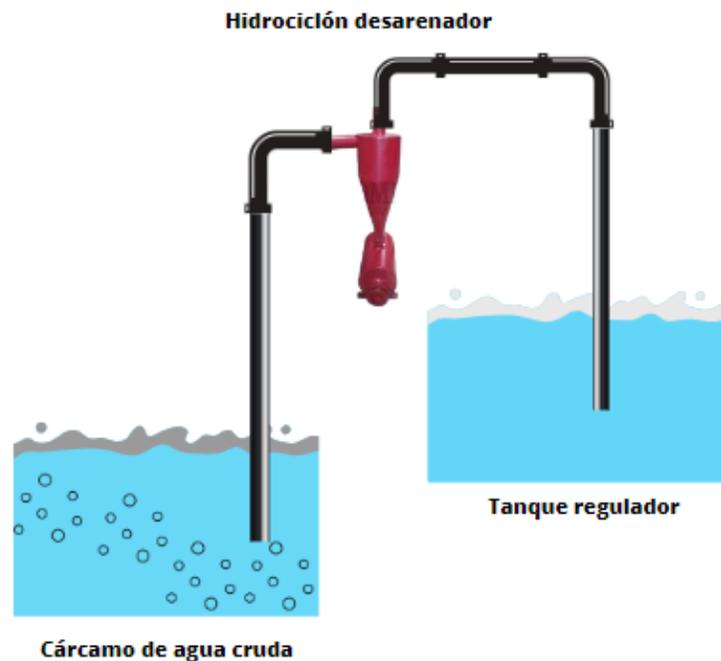


Figura 4.4 Instalación de hidrociclón desarenador

En la PTAR de FCPyS, según el trabajo de tesina de Gonzalez,2013; se registran caudales diferentes al caudal medio en días de operación normal de 1.5 lps que se utilizó para el diseño del hidrociclón, estos son: gasto promedio en el periodo medido de 1.11 lps, gasto promedio en periodo vacacional de 0.75 lps y un pico extraordinario de 2.55 lps. Si se evalúa la ecuación de Plitt modificada por Luz con los datos de los demás caudales se observa que el tamaño de corte varía de la manera indicada en figura 4.3.

En la figura 4.5 se observa que cuando el caudal disminuye las partículas correspondientes al tamaño de corte aumentan de tamaño; es decir, el hidrociclón será menos eficiente del 50% ya que pasará una mayor cantidad de partículas superiores a 0.21 mm. En cambio, cuando el caudal es mayor a 1.5 lps que fue el valor de diseño el hidrociclón funciona con una eficiencia mayor al 50%.

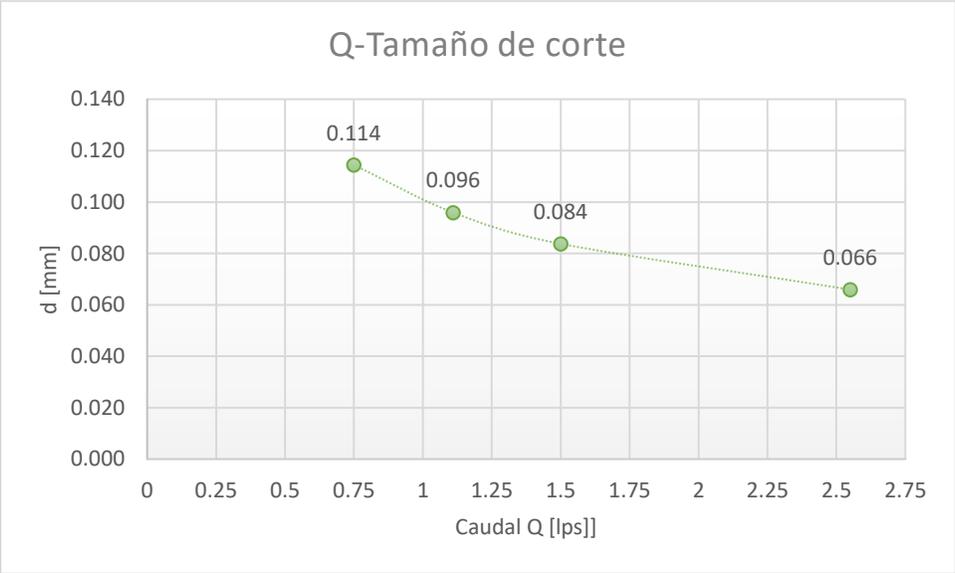


Figura 4.5. Relación caudal-tamaño de partícula

IV.2 Aplicación de hidrociclón en clasificación de lodo granular

La aplicación de hidrociclón en la clasificación de lodos activados se hará con base en el índice Volumétrico de Lodos (IVL) medido que es de 120 mg/l (González, 2013), que se encuentra en un rango aceptable y la gravedad específica de un lodo activado de buena calidad según la tabla 2.1; esto se puede mejorar con la ayuda del hidrociclón. Para la PTAR de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, ya se han calculado las condiciones operativas específicas, donde, según el trabajo de tesina de González el caudal medio en días de operación normal asciende a 1.5 lps, de igual manera, será el gasto que se usará para dimensionamiento de hidrociclón clasificador de lodos.

- Cálculo de la masa específica de los sólidos

$$Q = 1.5 \frac{l}{s} = 3.178 \frac{ft^3}{min} \quad IVL = 120 \frac{mg}{l} \quad (4.9)$$

$$Ge = \frac{1.010+1.017}{2} = 1.0135 \quad \rho_s = 998.2 \frac{kg}{m^3} * 1.0135 = 1011.6757 \frac{kg}{m^3} \quad (4.10)$$

- Relación de concentración de sólidos

$$\frac{1l}{1011.6757 \frac{mg}{l}} = \frac{x}{120 \frac{mg}{l}} \quad (4.11)$$

$$x = \frac{1l * 120 \frac{mg}{l}}{1011.6757 \frac{mg}{l}} = 0.1186l \quad (4.12)$$

Por lo tanto, de un litro de la mezcla los sólidos ocupan 0.1168l

- Para un instante de 1 segundo

$$V = 1.5 \frac{l}{s} * 1s = 1.5l_{agua\ residual} \quad (4.13)$$

$$\% \frac{V}{V} = \frac{x}{V} * 100 = \frac{0.1186l_{sólidos}}{1.5l_{volumen\ en\ la\ entrada}} * 100 = 7.9\% \quad (4.14)$$

Ahora se procede a definir el diámetro medio (d_{50}), la masa específica del fluido y de los sólidos. El tamaño de corte tendrá el valor de 3 mm ya que ahora importa retener los flóculos más grandes y de mejor calidad posibles. En seguida, se realizan las conversiones de unidades necesarias para ser compatible con la ecuación de Plitt modificada por Luz.

$$d_{50} = 3mm * 0.74 * \left(\frac{1000 \mu m}{1 mm} \right) = 3000 \mu m \quad (4.15)$$

$$\rho_l = 998.2 \frac{kg}{m^3} \left(\frac{1lb}{0.4536kg} \right) \left(\frac{1m^3}{61023.7in^3} \right) = 0.036 \frac{lb}{in^3} \quad (4.16)$$

$$\rho_s = 1011.6757 \frac{kg}{m^3} \left(\frac{1lb}{0.4536kg} \right) \left(\frac{1m^3}{61023.7in^3} \right) = 0.037 \frac{lb}{in^3} \quad (4.17)$$

Sustituyendo valores en la ecuación de Plitt modificada por Luz con los parámetros geométricos que propone Rietema y una propuesta de relación $Du=0.12 \cdot Dc$ y $h=2.5 \cdot Dc$

$$3000 \mu m = \frac{52.45 Dc^{0.46} (0.28Dc)^{0.6} (0.34 Dc)^{1.21} e^{0.063(7.9)}}{(0.12Dc)^{0.71} (2.5Dc)^{0.38} 3.178 \frac{ft^3}{min}^{0.45} \left(0.037 \frac{lb}{in^3} - 0.036 \frac{lb}{in^3} \right)^{0.5}} \quad (4.18)$$

- Resolviendo la ecuación resulta:
Dc=3.65 in; equivalente a Dc=9.3 cm

De la misma forma que en el caso de desarenador las relaciones geométricas más extremas de las tres principales familias de hidrociclones son las de los autores Rietema y Bradley, consecuentemente, con base en ellas se realizaron los siguientes ensayos de hidrociclones variando los factores que afectan a Du y h , los ensayos se muestran en la figura 4.6 así como la tabla resumen en centímetros (tabla 4.2), en ella se ha coloreado la celda de rojo que cumple el ángulo recomendado. De esta serie de ensayos que cumplen se seleccionará el dispositivo que muestra las mejores características geométricas.

| Rietema Ensayo 1 | | | | |
|------------------|----------------------|--------|-------|--------|
| | Unidades | factor | | exp |
| cte | adim | 1 | 52.45 | 1 |
| Dc | in | 1 | 3.65 | 0.46 |
| Di | in | 0.28 | 1.02 | 0.6 |
| D0 | in | 0.34 | 1.24 | 1.21 |
| e | adim | 1 | 2.72 | 0.4977 |
| v | adim | 1 | 7.90 | 1 |
| Du | in | 0.12 | 0.44 | 0.71 |
| h | in | 2.5 | 9.12 | 0.38 |
| Q | ft ³ /min | 1 | 3.18 | 0.45 |
| ps-pl | lb/in ³ | 1 | 0.001 | 0.5 |

d50

3000.00

0.00

| Rietema Ensayo 2 | | | | |
|------------------|----------------------|--------|-------|--------|
| | Unidades | factor | | exp |
| cte | adim | 1 | 52.45 | 1 |
| Dc | in | 1 | 4.88 | 0.46 |
| Di | in | 0.28 | 1.37 | 0.6 |
| D0 | in | 0.34 | 1.66 | 1.21 |
| e | adim | 1 | 2.72 | 0.4977 |
| v | adim | 1 | 7.90 | 1 |
| Du | in | 0.18 | 0.88 | 0.71 |
| h | in | 2.9 | 14.16 | 0.38 |
| Q | ft ³ /min | 1 | 3.18 | 0.45 |
| ps-pl | lb/in ³ | 1 | 0.001 | 0.5 |

d50

3000.00

0.00

| Rietema Ensayo 3 | | | | |
|------------------|----------------------|--------|-------|--------|
| | Unidades | factor | | exp |
| cte | adim | 1 | 52.45 | 1 |
| Dc | in | 1 | 4.96 | 0.46 |
| Di | in | 0.28 | 1.39 | 0.6 |
| D0 | in | 0.34 | 1.69 | 1.21 |
| e | adim | 1 | 2.72 | 0.4977 |
| v | adim | 1 | 7.90 | 1 |
| Du | in | 0.2 | 0.99 | 0.71 |
| h | in | 2.5 | 12.40 | 0.38 |
| Q | ft ³ /min | 1 | 3.18 | 0.45 |
| ps-pl | lb/in ³ | 1 | 0.001 | 0.5 |

d50

3000.00

0.00

| Rietema Ensayo 4 | | | | |
|------------------|----------------------|--------|-------|--------|
| | Unidades | factor | | exp |
| cte | adim | 1 | 52.45 | 1 |
| Dc | in | 1 | 5.52 | 0.46 |
| Di | in | 0.28 | 1.55 | 0.6 |
| D0 | in | 0.34 | 1.88 | 1.21 |
| e | adim | 1 | 2.72 | 0.4977 |
| v | adim | 1 | 7.90 | 1 |
| Du | in | 0.25 | 1.38 | 0.71 |
| h | in | 2.3 | 12.70 | 0.38 |
| Q | ft ³ /min | 1 | 3.18 | 0.45 |
| ps-pl | lb/in ³ | 1 | 0.001 | 0.5 |

d50

3000.00

0.00

| Rietema Ensayo 5 | | | | |
|------------------|----------------------|--------|-------|--------|
| | Unidades | factor | | exp |
| cte | adim | 1 | 52.45 | 1 |
| Dc | in | 1 | 6.71 | 0.46 |
| Di | in | 0.28 | 1.88 | 0.6 |
| D0 | in | 0.34 | 2.28 | 1.21 |
| e | adim | 1 | 2.72 | 0.4977 |
| v | adim | 1 | 7.90 | 1 |
| Du | in | 0.3 | 2.01 | 0.71 |
| h | in | 3 | 20.14 | 0.38 |
| Q | ft ³ /min | 1 | 3.18 | 0.45 |
| ps-pl | lb/in ³ | 1 | 0.00 | 0.5 |

d50

3000.00

0.00

| Bradley Ensayo 1 | | | | |
|------------------|----------------------|--------|-------|--------|
| | Unidades | factor | | exp |
| cte | adim | 1 | 52.45 | 1 |
| Dc | in | 1 | 8.48 | 0.46 |
| Di | in | 0.1333 | 1.13 | 0.6 |
| D0 | in | 0.2 | 1.70 | 1.21 |
| e | adim | 1 | 2.72 | 0.4977 |
| v | adim | 1 | 7.90 | 1 |
| Du | in | 0.13 | 1.10 | 0.71 |
| h | in | 1.69 | 14.33 | 0.38 |
| Q | ft ³ /min | 1 | 3.18 | 0.45 |
| ps-pl | lb/in ³ | 1 | 0.00 | 0.5 |

d50

3000.00

0.00

| Bradley Ensayo 2 | | | | |
|------------------|----------------------|--------|-------|--------|
| | Unidades | factor | | exp |
| cte | adim | 1 | 52.45 | 1 |
| Dc | in | 1 | 7.65 | 0.46 |
| Di | in | 0.1333 | 1.02 | 0.6 |
| D0 | in | 0.2 | 1.53 | 1.21 |
| e | adim | 1 | 2.72 | 0.4977 |
| v | adim | 1 | 7.90 | 1 |
| Du | in | 0.1 | 0.76 | 0.71 |
| h | in | 2 | 15.29 | 0.38 |
| Q | ft ³ /min | 1 | 3.18 | 0.45 |
| ps-pl | lb/in ³ | 1 | 0.00 | 0.5 |

d50

3000.00

0.00

| Bradley Ensayo 3 | | | | |
|------------------|----------------------|--------|-------|--------|
| | Unidades | factor | | exp |
| cte | adim | 1 | 52.45 | 1 |
| Dc | in | 1 | 8.62 | 0.46 |
| Di | in | 0.1333 | 1.15 | 0.6 |
| D0 | in | 0.2 | 1.72 | 1.21 |
| e | adim | 1 | 2.72 | 0.4977 |
| v | adim | 1 | 7.90 | 1 |
| Du | in | 0.122 | 1.05 | 0.71 |
| h | in | 2 | 17.24 | 0.38 |
| Q | ft ³ /min | 1 | 3.18 | 0.45 |
| ps-pl | lb/in ³ | 1 | 0.00 | 0.5 |

d50

3000.00

0.00

| Bradley Ensayo 4 | | | | |
|------------------|----------------------|--------|-------|--------|
| | Unidades | factor | | exp |
| cte | adim | 1 | 52.45 | 1 |
| Dc | in | 1 | 11.44 | 0.46 |
| Di | in | 0.133 | 1.52 | 0.6 |
| D0 | in | 0.2 | 2.29 | 1.21 |
| e | adim | 1 | 2.72 | 0.4977 |
| v | adim | 1 | 7.90 | 1 |
| Du | in | 0.165 | 1.89 | 0.71 |
| h | in | 2.73 | 31.22 | 0.38 |
| Q | ft ³ /min | 1 | 3.18 | 0.45 |
| ps-pl | lb/in ³ | 1 | 0.00 | 0.5 |

d50

3000.00

0.00

| Bradley Ensayo 5 | | | | |
|------------------|----------------------|--------|-------|--------|
| | Unidades | factor | | exp |
| cte | adim | 1 | 52.45 | 1 |
| Dc | in | 1 | 14.95 | 0.46 |
| Di | in | 0.133 | 1.99 | 0.6 |
| D0 | in | 0.2 | 2.99 | 1.21 |
| e | adim | 1 | 2.72 | 0.4977 |
| v | adim | 1 | 7.90 | 1 |
| Du | in | 0.27 | 4.04 | 0.71 |
| h | in | 2.5 | 37.38 | 0.38 |
| Q | ft ³ /min | 1 | 3.18 | 0.45 |
| ps-pl | lb/in ³ | 1 | 0.00 | 0.5 |

d50

3000.00

0.00

Figura 4.6. Ensayos para diseño de hidrociclón

| N° ensayo | | cm | | | | | | | | Grados |
|-----------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|----------|
| | | $d50$ | D_c | D_i | D_o | D_u | h | l | L | θ |
| 1 | Rietema | 0.3 | 9.3 | 2.6 | 3.2 | 1.1 | 23.2 | 3.7 | 46.3 | 19.4 |
| 1 | Bradley | 0.3 | 21.5 | 2.9 | 4.3 | 2.8 | 36.4 | 7.1 | 147.6 | 27.2 |
| 2 | Rietema | 0.3 | 12.4 | 3.5 | 4.2 | 2.2 | 36.0 | 5.0 | 62.0 | 15.8 |
| 2 | Bradley | 0.3 | 19.4 | 2.6 | 3.9 | 1.9 | 38.8 | 6.4 | 133.0 | 24.2 |
| 3 | Rietema | 0.3 | 12.6 | 3.5 | 4.3 | 2.5 | 31.5 | 5.0 | 63.0 | 17.7 |
| 3 | Bradley | 0.3 | 21.9 | 2.9 | 4.4 | 2.7 | 43.8 | 7.2 | 149.9 | 23.7 |
| 4 | Rietema | 0.3 | 14.0 | 3.9 | 4.8 | 3.5 | 32.3 | 5.6 | 70.1 | 18.1 |
| 4 | Bradley | 0.3 | 29.0 | 3.9 | 5.8 | 4.8 | 79.3 | 9.6 | 199.0 | 17.0 |
| 5 | Rietema | 0.3 | 17.1 | 4.8 | 5.8 | 5.1 | 51.2 | 6.8 | 85.3 | 13.1 |
| 5 | Bradley | 0.3 | 38.0 | 5.1 | 7.6 | 10.3 | 94.9 | 12.5 | 260.1 | 16.3 |

Tabla 4.2. Resumen de ensayos para diseño de hidrociclón para gránulos aerobios

Finalmente se escogió el dimensionamiento que muestra el ensayo de Rietema 1 ya que muestra buenas características geométricas y es más compacto con relación a los demás, ver dimensiones en figura 4.7. En la figura 4.8 se muestra el cálculo realizado con la herramienta SMath Solver.

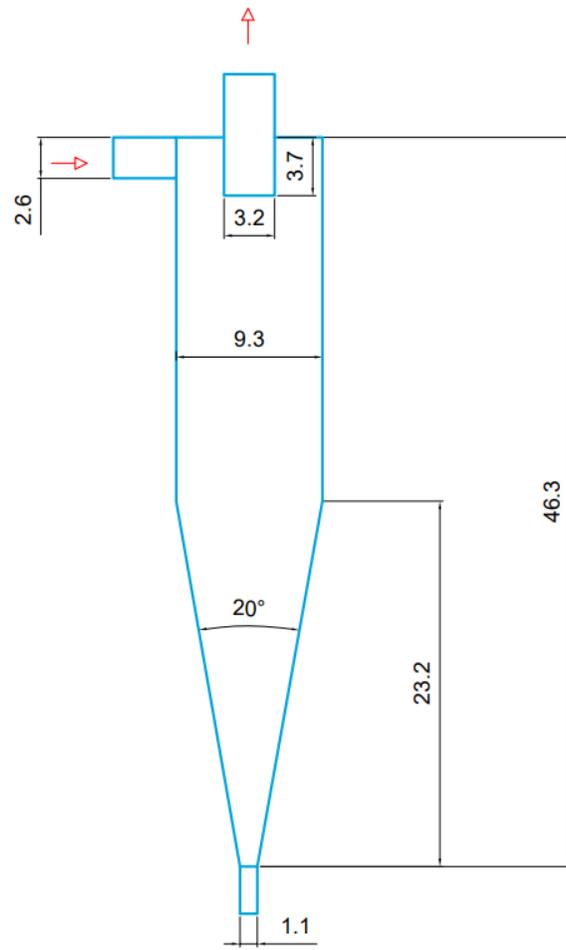


Figura 4.7. Dimensionamiento de hidrociclón para clasificación de lodos (acotaciones en cm)

Rietema ensayo 1

$$d50 := 3000 \quad \text{um}$$

$$Dc := 3.65 \quad \text{in}$$

Factores en denominador

$$x := 0.12$$

$$y := 2.5$$

Ecuación de Plitt

$$\frac{52.45 \cdot Dc^{0.46} \cdot (0.28 \cdot Dc)^{0.6} \cdot (0.34 \cdot Dc)^{1.21} \cdot e^{0.063 \cdot 7.9}}{(x \cdot Dc)^{0.71} \cdot (y \cdot Dc)^{0.38} \cdot 3.178^{0.45} \cdot (0.037 - 0.036)^{0.5}} = 3001.78$$

$$Du := Dc \cdot x \cdot 2.54 = 1.1125 \quad \text{cm}$$

$$h := Dc \cdot y \cdot 2.54 = 23.1775 \quad \text{cm}$$

$$Dc' := Dc \cdot 2.54 = 9.271 \quad \text{cm}$$

$$z := \frac{Dc' - Du}{h} \cdot 2 = 0.352$$

$$\frac{\text{atan}(z)}{\pi} \cdot 180 = 19.3921 \quad \theta$$

Figura 4.8. Resolución ecuación de Plitt con SMath Solver

El hidrociclón clasificador de gránulos del reactor aerobio discontinuo será instalado en la línea de purga de lodos que se bombea desde tanque SBR hacia el reactor anaerobio, como se muestra en la figura 4.9. Separando y regresando los gránulos (mayor densidad) al reactor SBR aerobio.

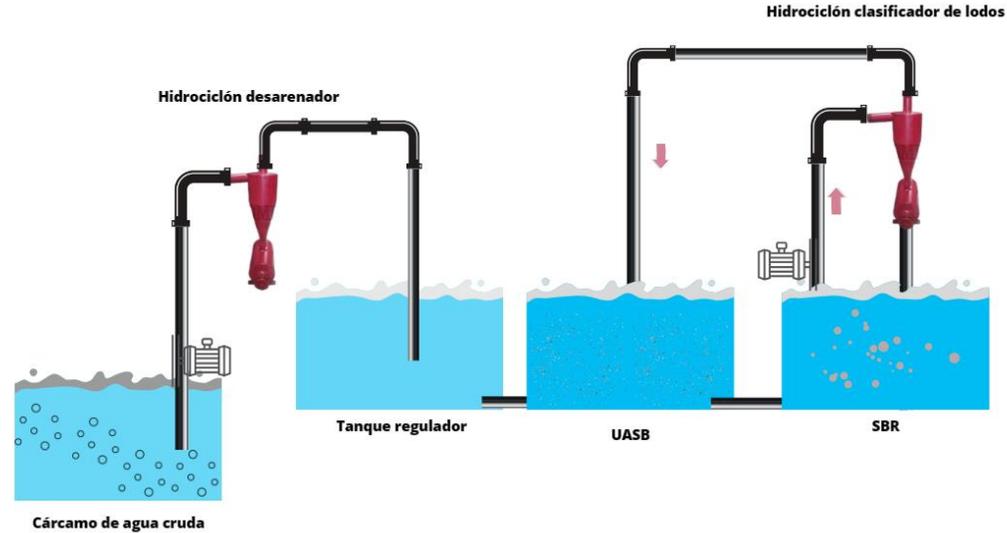


Figura 4.9. Instalación de hidrociclón clasificador de lodos de mayor densidad

V. Conclusiones

Con el análisis detallado de las variables diámetro de salida para material más denso, y altura del hidrociclón usando el modelo de Plitt, a su vez modificado con análisis de Luz para cada ensayo, se obtuvo el ensayo con mejores características geométricas; que a su vez mantiene las proporciones que permiten una correcta entrada y salida de material, y se adecúa al rango de ángulo límite que propone cada autor.

A partir de la información citada y datos de caudales de la planta se logró el diseño de un desarenador que funciona bajo el principio de vórtice en un hidrociclón que podría ser instalado a la salida del bombeo del tanque regulador que acumula arenas, y utilizarse en plantas pequeñas donde el espacio reducido requiere la aplicación de pequeños hidrociclones.

Utilizando la misma metodología y usando datos de lodos activados con buena sedimentación se alcanzó el diseño de un clasificador compacto de biomasa contenida en la purga del reactor aerobio discontinuo que sólo permitiría el arrastre de lodos biológicos más ligeros por la parte superior del hidrociclón y en cambio, a la salida inferior, sedimentarían y se retornarían al reactor aerobio discontinuo los lodos de mayor densidad que tienden a formar gránulos aerobios.

Debido a que el dimensionamiento de los hidrociclones se llevó a cabo con bases documentales se recomienda la elaboración de experimentos para calibración de hidrociclón en laboratorio o en sitio.

Referencias

- Arvizu Fernández. (1996). *Tratamiento anaerobio-aerobio de las aguas residuales de las instalaciones de la IIE*. 26 de abril del 2021, de INEEL Sitio web: <https://www.ineel.mx/publica/bolso96/aplica.htm>
- López & Martín. (2015). UF1666: *Depuración de aguas residuales*. España: Elearning S.L.
- Gonowska-Szneler. (2015). *Dimensioning of vortex separators*. 26 de abril 2021, de Gdansk university of technology
- Meunier Mectan. (2015). *Induced vortex grid chamber*. 26 de abril 2021, de VEOLIA Sitio web: www.veoliawatertechologies.ca
- Jarman. (2016). *An introduction to vortex flows and their implications on solid-liquid separation*. 24 de abril 2021, de Hydro international Sitio web: hydro-int.com
- Gardea. (2001). *Conceptos básicos sobre la formación y teoría de los vórtices*. 5 mayo 2021, de UNAM Sitio web: [v02n2-04.pdf \(unam.mx\)](http://v02n2-04.pdf(unam.mx))
- González. (2013). Propuesta técnica para recuperación de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Facultad de Ciencias Políticas y sociales de la unam. 7 junio 2013, de UNAM Sitio web: [Tesina Propuesta técnica para PTAR de FCPyS.pdf \(unam.mx\)](http://Tesina%20Propuesta%20técnica%20para%20PTAR%20de%20FCPyS.pdf(unam.mx))
- Partin. (2019). *Hydrocyclone Implementation at Two Wastewater Treatment Facilities to Promote Overall Settling Improvement*. De Virginia Polytechnic Institute
- YAMIT. (2018). *Catálogo de Hidrociclones*. YAMIT Filtration y Water Treatment. 10 septiembre, Sitio web: [PowerPoint Presentation \(yamit-f.com\)](http://PowerPoint%20Presentation(yamit-f.com))
- Pedraza. (2018). *Diseño y construcción de un hidrociclón a nivel laboratorio*, De Universidad Pedagógica de Colombia.
- Arteburn. (1976). *The Sizing og Hydrocyclones*, Krebs Engineers, Menlo Park, CA.
- Davailles. (2011). *Effet de la concentration en solide sur les performances de séparation d'un hydrocyclone*, De Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Luz (2005) [Minas 15.PMD \(scielo.br\)](http://Minas%2015.PMD(scielo.br))
- Shi Y., Wells G., Morgenroth E. (2016) *Microbial activity balance un size fractionated suspend growth biomass from full-scale sidestream combined nitrification-anammox*, de ELSERVIER Sitio web: [Microbial activity balance in size fractionated suspended growth biomass from full-scale sidestream combined nitrification-anammox reactors - ScienceDirect](http://Microbial%20activity%20balance%20in%20size%20fractionated%20suspended%20growth%20biomass%20from%20full-scale%20sidestream%20combined%20nitrification-anammox%20reactors%20-%20ScienceDirect)
- Nancharaiah Y. V., Kiran Kumar Reddy G. (2017) *Aerobic granular sludge technology: Mechanisms of granulation and biotechnological applications*, de ELSERVIER Sitio web: [Aerobic granular sludge technology: Mechanisms of granulation and biotechnological applications - ScienceDirect](http://Aerobic%20granular%20sludge%20technology:%20Mechanisms%20of%20granulation%20and%20biotechnological%20applications%20-%20ScienceDirect)

Güenchea, (2015) *Caracterización de microhidrociclones*, Universidad del País Vasco Sitio web: [Caracterización de microhidrociclones.pdf \(ehu.es\)](#)

Ortiz, (2015) *Separación de una suspensión de dos tipos de partículas en un hidrociclón Rietema mediante CFD*, Universidad de los andes Sitio web: [u714337.pdf \(uniandes.edu.co\)](#)

Silva et al. (2013) Hydrocyclones simulation using a new modification in Plitt's equation. IFAC Proceedings. Sitio web: [Hydrocyclones simulation using a new modification in Plitt's equation - ScienceDirect](#)