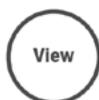




Modelación y construcción de un hidrociclón

Renato González Bernal, Jesús Cirilo Trujillo Jiménez

Para citar este artículo: [González Bernal R., Cirilo Trujillo Jiménez J.C. 2022. Modelación y construcción de un hidrociclón. Ciencia Nicolaita, número 83, 278-288 DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.571>](#)



[Ver material suplementario](#)



[Publicado en línea, enero de 2022](#)



[Envíe su artículo a esta revista](#)

Modelación y construcción de un hidrociclón

Renato González Bernal*, Jesús Cirilo Trujillo Jiménez

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Mecánica

HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 16 de septiembre de 2021

Aceptado: 9 de noviembre de 2021

RESUMEN

Se realizó la modelación y construcción de un hidrociclón como parte del equipo de perforación de pozos profundos para la extracción de agua y vapor de agua, el cual tiene la función de separar las arenas del suelo del fluido de perforación para no dañar la bomba de lodos. En el presente trabajo se utilizó la modelación matemática para llevar a cabo la construcción del prototipo y finalmente realizar la modelación física. Este modelo matemático se usó para diagnosticar el funcionamiento del diseño previo que se tenía del hidrociclón. Una vez terminada la modelación matemática se llevó a cabo la construcción del prototipo, en acero A 36. Se realizaron las pruebas en el prototipo construido utilizando una mezcla de agua con arena para evaluar el funcionamiento del hidrociclón. Se determinó el tamaño de corte d50, de las partículas. El hidrociclón funciona aceptablemente, separando las partículas de mayor tamaño.

PALABRAS CLAVE: modelación, construcción, hidrociclón, tamaño de corte, torbellino

ABSTRACT

The modeling and construction of a hydrocyclone was carried out as part of the deep well drilling equipment for water extraction, which has the function of separating the sands from the ground from the drilling fluid so as not to damage the slurt pump. In the present work, mathematical modeling was used to carry out the construction of the prototype and finally perform physical modeling.

This mathematical model was used to diagnose the operation of the previous design of the hydrocyclone. Once the mathematical modeling was finished, the construction of the prototype was carried out, in A 36 steel. Tests were performed on the prototype built using a mixture of water with sand to evaluate the operation of the hydrocyclone. The cut size d50 of the particles was determined. The hydrocyclone works acceptably by separating the larger particles.

KEYWORDS: modeling, construction, hydrocyclone, cut size, whirlwind

Introducción

Los pozos excavados se encuentran entre las fuentes de aprovisionamiento de agua más antiguas. Los primeros pozos eran simples agujeros sin protección frente a los desprendimientos y que no han resistido el paso del tiempo, desapareciendo.

Existen tres grandes categorías de pozos: los excavados, los hincados y los aforados, más comúnmente conocidos como perforaciones, término ambiguo que designa al mismo tiempo una obra y una técnica de trabajo. Muchos de los pozos modernos son pozos aforados excavados por percusión de una herramienta en el suelo o por la acción rotatoria de una herramienta cortante que gira alrededor de un eje vertical y rompe y tritura las rocas, cuyos residuos suelen llevarse hasta la superficie a través de lodos. Una vez en la superficie la mezcla de lodo bentónico con residuos del suelo se limpia para separar los residuos del suelo a través de la circulación del flujo en hidrociclones y poder volver a utilizar el lodo bentónico en la bomba de lodos sin causar daños a ésta (Breff *et al.*, 2014).

Los hidrociclones son equipos destinados principalmente a la separación de suspensiones sólido – líquido, ejemplo de ello es el lavado de lodos eliminando partículas nocivas (AMP). La función principal del hidrociclón es separar los sólidos suspendidos en un determinado flujo de la masa de “alimentación”, en dos fracciones, una que acompaña al flujo llamado “descarga” que lleva en suspensión los sólidos más gruesos que un determinado tamaño de corte y otra fracción que acompaña al flujo denominado “rebose”, que lleva en suspensión los sólidos más finos que el citado tamaño. El flujo de masa de alimentación entra tangencialmente en la parte cilíndrica a una cierta presión, lo que genera su rotación alrededor del eje longitudinal del hidrociclón, formándose un “torbellino primario” descendente hacia el vértice inferior del hidrociclón. Las partículas más gruesas giran cercanas a la pared por efecto de la aceleración centrífuga, siendo evacuadas a través de la boquilla en forma de pulpa espesa. Debido a las reducidas dimensiones de dicha boquilla, solamente se descarga una parte de la suspensión, creándose en el vértice inferior un “torbellino secundario” de trayectoria ascende-

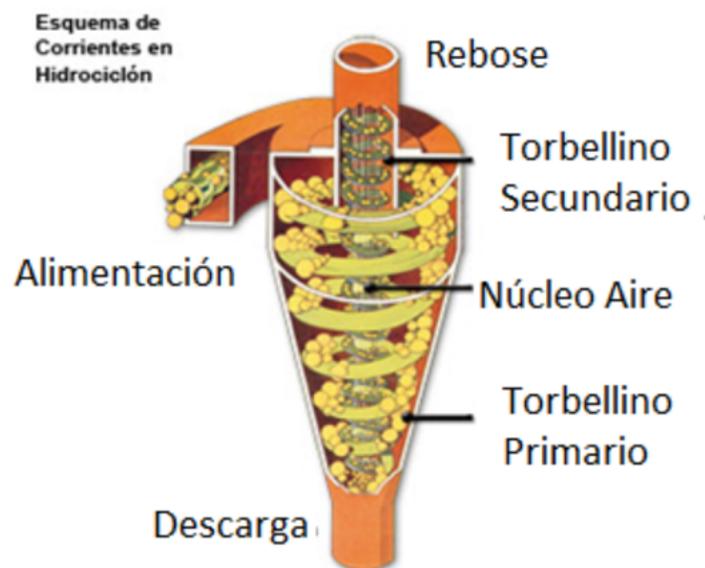


FIGURA 1. Hidrociclón.

nte, que es donde se produce la separación al generarse en este punto las mayores aceleraciones tangenciales. Esta corriente arrastra hacia el rebose las partículas finas junto con la mayor parte del líquido, que se descarga a través de un tubo central situado en el cuerpo cilíndrico superior del hidrociclón. Para ajustar el tamaño de separación de las partículas sólidas entre 10 y 500 micras, se regula la aceleración del torbellino y se modifica la geometría y/o toberas del hidrociclón (Betancourt et al. 2020). La arena de trituración de rocas puede tener un tamaño máximo de 4,76 mm y como tamaño mínimo 0,149 mm. Por lo que en este trabajo se establece separar partículas de 149 micras (cementos Ciba, 2017).

Objetivos

El propósito de este trabajo es modelar y construir un prototipo de hidrociclón en el laboratorio de manufactura de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UMSNH, que contribuya en la perforación de pozos profundos realizados por esta institución.

Dinámica de flujo

El diseño y la operación de los hidrociclones dependen de los patrones de flujo que se producen en el interior del equipo durante la clasificación. Los patrones de flujo son gobernados por el número de Reynolds (Re) de la corriente de pulpa en el hidrociclón (Duran, 2013).

Tamaño de corte

El tamaño de corte es definido como en el diámetro de una partícula que tiene una probabilidad de ser separada. La separación de partículas se basa en la diferencia de densidad entre el líquido y la materia a separar. Una diferencia de densidad más alta da como resultado una separación más fina. El tamaño de partícula separada con

la geometría propuesta y las condiciones de flujo se puede determinar mediante la siguiente expresión matemática (Aryal et al., 2019).

$$d_p = \sqrt{\frac{n \times 0.01 \times 0.5(D - D_o) \times 18\eta}{(\rho_s - \rho_l)a\lambda}} \quad (1)$$

Donde

$$\lambda = \frac{L}{\frac{Q}{\pi\left(\frac{D^2 - D_o^2}{4}\right)}} \quad (2) \quad \text{y} \quad a = \frac{U_i^2}{D/2} \quad (3)$$

d_p = Diámetro de la particular eliminada, m

n = Probabilidad de atrapamiento de partículas %

D = Diámetro de la parte cilíndrica, m.

D_o = Diámetro de reboso, m

η = Viscosidad dinámica del agua, pa-s

ρ_s = Densidad del sólido, kg/m³

ρ_l = Densidad del líquido, kg/m³

λ = Tiempo de residencia, s

a = Aceleración, m/s²

U_i = Tasa de flujo de entrada, m³/s

Q = Velocidad inicial, m/s

La nitidez de esta clasificación viene dada por la relación $I = d_{75}/d_{25}$, el índice de nitidez indica la pendiente de clasificación de la curva. Por lo general las curvas de clasificación se modelan con funciones sigmoidales por ejemplo Rosin Rammler (Vesiland, 1980)

$$C(x_i) = 1 - e^{(-0.693\left(\frac{x_i}{d_{50}}\right)^Y)} \quad (4)$$

$x_i =$ el tamaño de partícula

$\gamma = \frac{1.5725}{\ln(l)}$ = *parámetro experimental dependiente de la nitidez.*

Eficiencia de un hidrociclón

El método más utilizado para evaluar la eficiencia de un ciclón es mediante la construcción de la curva de rendimiento. Esta curva relaciona el porcentaje de cada tamaño presente en la sección de alimentación que es enviado al ápice con el tamaño de la partícula. El punto de corte d_{50} se define como el valor del tamaño de partículas que tiene la misma posibilidad de ir a la fracción gruesa o a la fracción fina o como aquel punto sobre la curva para el cual el D50% de las partículas de ese tamaño en la alimentación se presentan en el derrame.

Diferentes modelos matemáticos desarrollados para los hidrociclones incluyen el término d_{50} corregido, tomando de la curva de

de clasificación corregida. La corrección de esta curva puede ser necesaria para sólidos de todos los tamaños que son enviados a la descarga lo cual genera un cortocircuito en proporción directa a la fracción del agua en la alimentación y que llega a la sección de descarga (Pedraza, 2018).

La eficiencia de separación o imperfección se encuentra dada por:

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2d_{50}} \tag{5}$$

Se puede tomar como referencia que un valor de cero, indica una clasificación ideal (Pedraza, 2018).

Metodología

El trabajo se organizó de la siguiente manera: primero se obtuvo el diseño de el hidrociclón, se realizó la modelación matemática, construcción y se realizaron pruebas físicas.

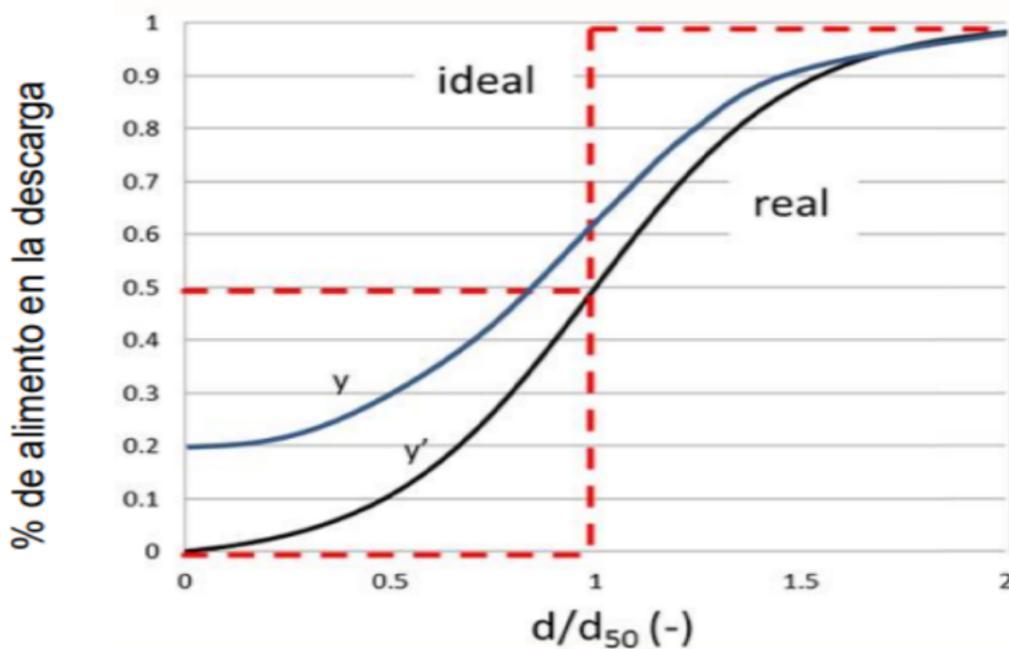


FIGURA 2. Curva de rendimiento sin corregir y corregida.



FIGURA 3. Esquema de metodología.

Geometría

Para la modelación y elaboración del hidrociclón se consideró la geometría mostrada en la figura 4. La elección de las dimensiones se realizó después de revisar en la literatura las relaciones geométricas expuestas (Rietema, 1961; Aryal *et al.*, 2019).

Modelación matemática

Se utilizó el modelo de turbulencia K-Omega SST, el cual combina la formulación de transporte de esfuerzo cortante y el uso de la formulación de capa límite. Con ayuda de un software llamado Simscales® se resuelven las ecuaciones del modelo, aplicando esquemas de discretización y solucionadores de ecuaciones (Mendoza *et al.*, 2019; Simscales®).

Geometría

Se realizó el volumen interior del hidrociclón con ayuda del software Solidworks®.

Materiales

Se seleccionó agua como fluido.

Condiciones iniciales

El tipo de flujo que se seleccionó fue incompresible estacionario.

Condiciones de Frontera

Las paredes se consideraron como muros de no deslizamiento, el flujo de entrada fue de 0.003 m/s, se consideró la presión atmosférica en las salidas.

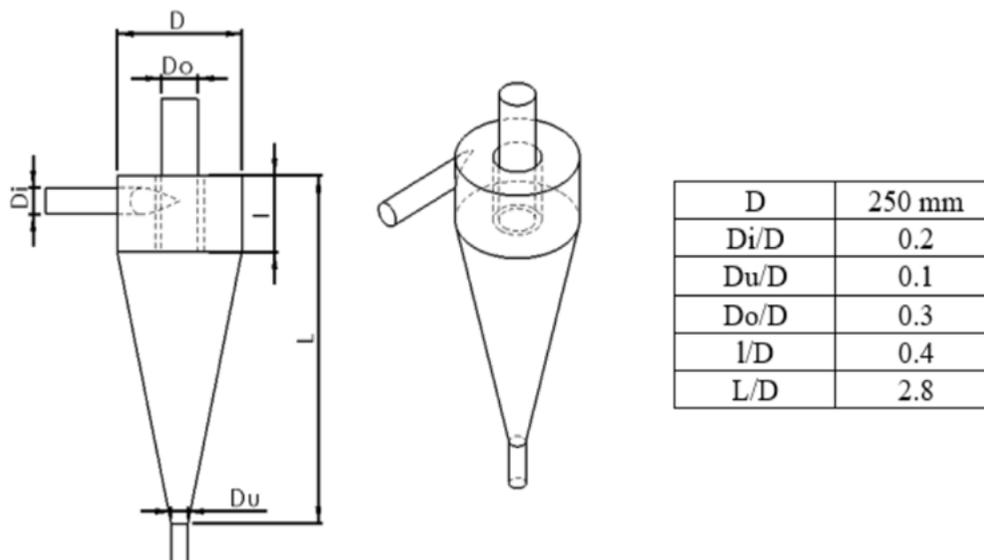


FIGURA 4. Geometría del prototipo del hidrociclón, cotas en milímetros.

Mallado

Se utilizó la herramienta de mallado automático hex-dominant el cual genera una malla que forma parte del software de código abierto OPENFOAM®.

Esta herramienta genera mallas tridimensionales no estructuradas o híbridas que consisten en elementos hexaédricos.

El hidrociclón mallado se muestra en la figura 5. El mallado contiene 3.2 M de elementos.

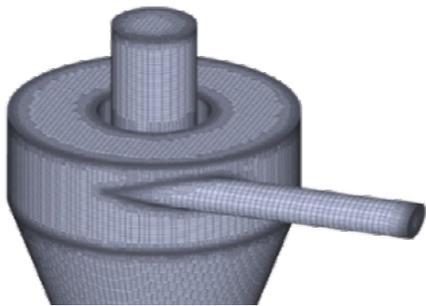


FIGURA 5. Malla del hidrociclón.

Solución

Finalmente se resolvió y se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 3. Representación matemática del modelo (Simscale®)

La energía turbulenta k viene dada por:

$$k = \frac{3}{2}(UI)^2 \tag{6}$$

Donde U es la velocidad media del flujo e I es la intensidad de la turbulencia.

La intensidad de la turbulencia da el nivel de turbulencia y se puede definir a continuación:

$$I = \frac{u'}{U} \tag{7}$$

Donde u' es la raíz cuadrada de las fluctuaciones de la velocidad turbulenta dada como:

$$u' = \sqrt{\frac{1}{3}(u'^2_x + u'^2_y + u'^2_z)} = \sqrt{\frac{2}{3}k} \tag{8}$$

La velocidad media U se puede calcular de la siguiente manera:

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \tag{9}$$

La tasa de disipación turbulenta específica se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$\omega = C_\mu^{\frac{3}{4}} \frac{k^{\frac{1}{2}}}{l} \tag{10}$$

Donde C_μ es la constante del modelo de turbulencia que usualmente toma el valor 0.09, k es la energía turbulenta, l es la escala de longitud turbulenta.

La escala de longitud de turbulencia describe el tamaño de grandes remolinos que contienen energía en un flujo turbulento.

Por tanto, la viscosidad turbulenta ν_t se calcula como:

$$\nu_t = \frac{k}{\omega} \tag{11}$$

Se obtuvieron las gráficas de campos de velocidades en los diferentes planos xz y xy , como se muestra en las figuras 6 y 7. En la figura 6, plano xz , se pueden observar los vectores de velocidad en tres posiciones diferentes, en la primera posición observamos que el flujo cercano a las paredes va descendiendo, en la parte media tiene velocidades horizontales y cercano al centro el flujo va ascendiendo. En el plano 2 la mayor diferencia que se observa respecto al plano anterior es que el flujo asciende a menor velocidad y conforme bajamos en el hidrociclón la velocidad de ascenso disminuye. También observamos que las mayores presiones se tienen en la pared del hidrociclón.

En la figura 7 se puede observar la formación del torbellino primario y el flujo ascende

dente por la parte interna del hidrociclón.

La aceleración centrífuga en el hidrociclón hace que las partículas de arena que tienen mayor densidad y tamaño, se localicen en el exterior del hidrociclón, descendiendo por el torbellino primario y saliendo por la descarga, debido a la reducción del área en la salida del hidrociclón el flujo no puede salir por la descarga, formándose un torbellino ascendente en el centro, lo que significa que el fluido sale por el reboso. También es posible observar en la figura 6 y 7 que, en la descarga con este flujo, el fluido sale en forma de espiral, por lo que analizado el modelado matemático, se considera pertinente su construcción.

Construcción del hidrociclón

Una vez propuesta la geometría se procedió con la manufactura del prototipo del hidrociclón, para lo cual se dividió en cinco partes principales:

- Cilindro superior y tubo de entrada
- Cono superior.
- Cono inferior.
- Salida inferior.
- Estructura.

Cono superior. Se calcularon las dimensiones de la plantilla para el cono superior. El cono se dividió en dos partes ya que la roladora está limitada a fabricar un diámetro mínimo de 125 mm de diámetro.

Cilindro superior. El cilindro se fabricó de lámina de acero A36 calibre 14. El material fue rolando y soldado. Se acoplaron el tubo de entrada de flujo y la salida de reboso como se muestra en la figura 8.

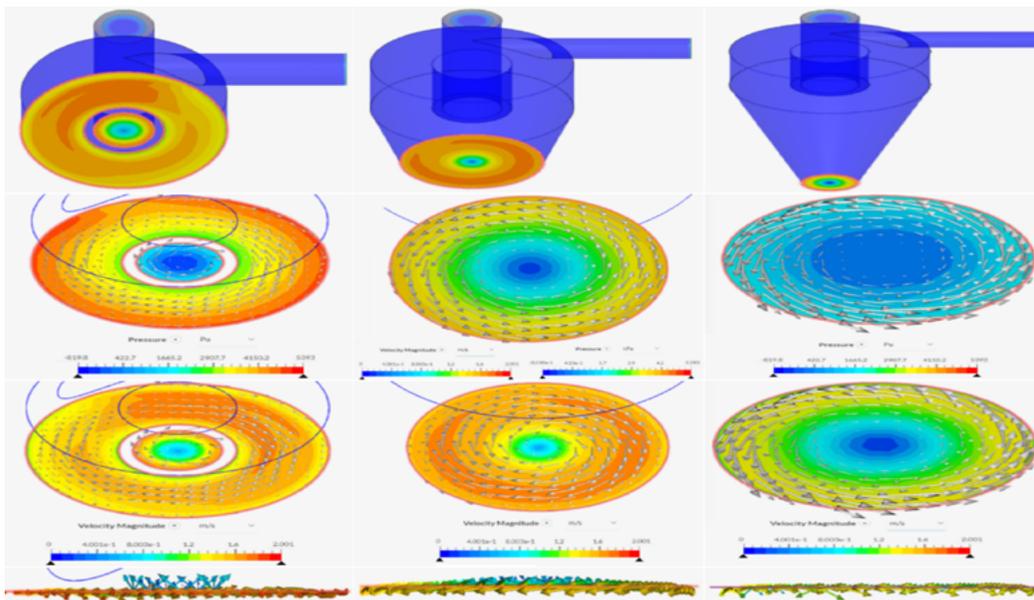


FIGURA 6. Modelación matemática del hidrociclón. Vectores de velocidad en el plano xy, líneas de corriente.

Fila 1 (posición) Fila 2 (contorno de presión) Fila 3 y 4 (contornos y vectores de velocidad a diferentes en el hidrociclón plano xz).

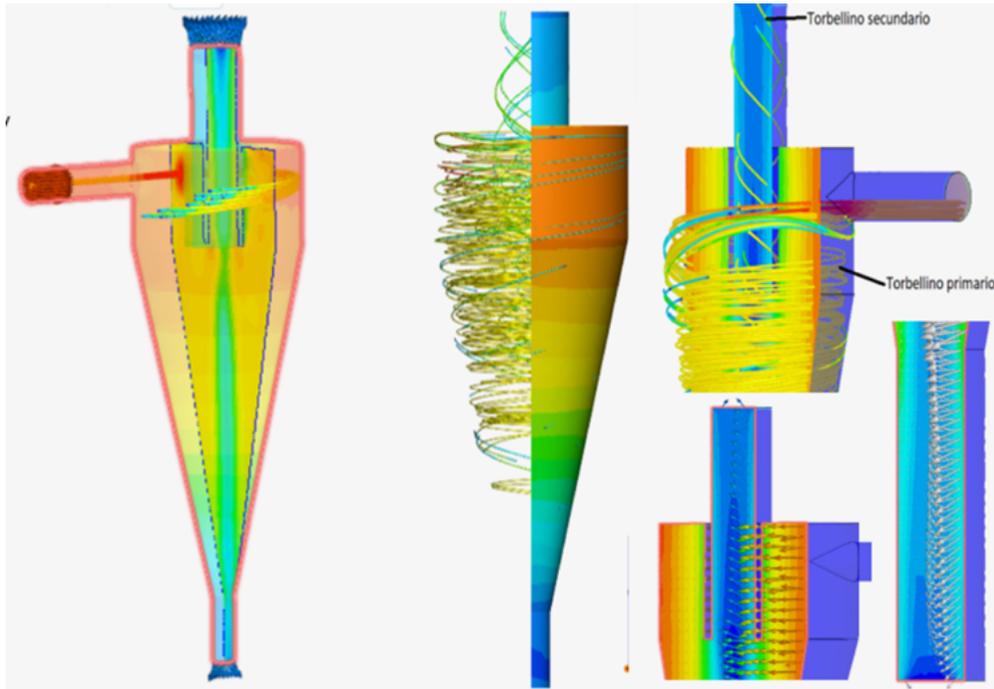


FIGURA 7. Modelación matemática del hidrociclón. Vectores de velocidad en el plano xy, líneas de corriente.



FIGURA 8. Cono superior e inferior.

Cono inferior. El cono inferior se fabricó en tres partes diferentes A, B y C, figura 8. Estas partes fueron torneadas y se unieron por medio de soldadura y reducen el diámetro interior del cono de 125 mm hasta de 50 mm.

Salida inferior. En la salida inferior se utilizó una sección más de reducción acoplado a un tubo de 1 pulgada de diámetro cédula 40 en la descarga.

Soporte. El soporte se fabricó una vez terminado el hidrociclón. Su principal función es mantener estático y en posición vertical al hidrociclón, para lo cual se determinó la fuerza que debería resistir la estructura y no se vuelque. Se realizó en PTR de 1.5 pulgadas cédula 14, se usaron articulaciones para sujetar el hidrociclón, como se muestra en la figura 8.

$$\sum_s F_x + \sum_v F_v = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC\ OUT} u_{pud} A - \int_{SC\ IN} u_{pud} A \quad (12)$$

Sustituyendo valores

$$F_x = 82.73 \text{ N} \quad M = F L = 82.73 * 1.8 = 148.9 \text{ Nm}$$

$$\tau = \frac{F}{A} + \frac{MD}{A} = 1.823 \text{ MPa} \quad (13)$$

Se considera conectar la estructura al piso mediante pernos de ½ pulgada grado SAE 1, con una resistencia de 220 MPa (Budynas *et al.*, 2008), para estabilizar el hidrociclón, los cuales generan una resistencia suficiente agua en el tanque de descarga.

Metodología de la prueba

Inicialmente se hicieron pruebas hidrostáticas en el hidrociclón. Una vez verificado que el prototipo no tuviera pérdidas, se realizó el estudio de funcionamiento de separación de material en el que se manejó una mezcla de agua con arena (5 kg/250 lts), figura 8. La arena simula la roca triturada del suelo. Se usa-

ron tres tanques el alimentador, el de descarga primaria y el de descarga por el tubo de reboso. Para llevar el agua al hidrociclón se utilizó una motobomba. Entre la bomba y el hidrociclón se alimentaba la arena y se obtuvo la mezcla de agua con arena. Se midió el caudal con un flujómetro ultrasónico el cual reportó un promedio de 175 lts/min. En el tubo de reboso del hidrociclón se conectó una tubería que mandaba la mezcla al tanque de descarga de reboso y el tubo inferior descargaba el agua en el tanque de descarga. No se pudieron hacer mediciones del caudal en la descarga con el flujómetro ultrasónico ya que el tubo no se llenaba completamente de fluido.

Una vez terminado el proceso de bombeo, se dejaron sedimentar los sólidos de la mezcla un tiempo de 48 hrs. Finalmente se recolectaron los sólidos en el tanque de descarga, el cual contenía gran cantidad de arena como se observa en la figura 9. Se realizó el mismo procedimiento en el tanque del reboso para observar cuánta arena gruesa había tomado la ruta del reboso, analizando el tanque se encontró una pequeña cantidad de arena muy fina. Una vez seco el material recolectado en la descarga y el reboso se pesó el material dando los resultados mostrados en la tabla 1.

Determinación del tamaño de corte y gráfica de recuperación de partículas

Con los datos de diseño y la ecuación (1) se determinó $d_{50}=92$ micras que es el tamaño de partícula que tiene la misma posibilidad de ir a la fracción gruesa o a la fracción fina. Con la ecuación 4 se obtuvo la curva de clasificación mostrada en la figura 10.

Resultados y conclusiones

Se observó en la modelación matemática la formación de los torbellinos primario y secundario. Se logró el objetivo principal del

proyecto que era la construcción de un hidrociclón.

Las pruebas de uso con arena resultaron adecuadas, sólo se hicieron con un caudal de mezcla, las partículas de arena de mayor tamaño salieron a través de la boquilla de descarga.

Se comprueba con las gráficas de recuperación de partículas el funcionamiento adecuado del hidrociclón con una posibilidad de separar las partículas de 149 micras del 91%. En el tamaño de 190 micras ya tiene una posibilidad de ser desalojada por la descarga de 99%.

Se recomienda realizar un estudio en el cual se pueda variar el caudal para conocer la capacidad máxima del hidrociclón y el punto donde tiene mayor eficiencia.

Se recomienda hacer un estudio variando el diámetro de descarga.

Se recomienda realizar un estudio específico del tamaño de partículas que se puedan expulsar en el hidrociclón.



A)

B)

FIGURA 9. A) Hidrociclón con soporte, B) Pruebas de funcionamiento.

TABLA 1. A) Hidrociclón con soporte, B) Pruebas de funcionamiento.

Arena total agregada (kg)	5
Arena recolectada en la descarga	4.5
Arena recolectada en el reboso	0.5



FIGURA 9. Funcionamiento de hidrociclón.

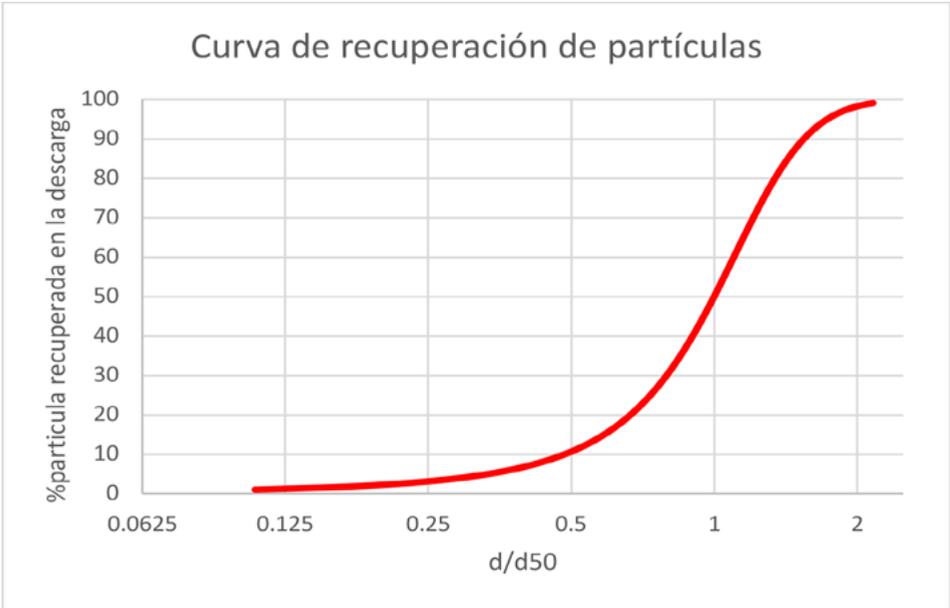


FIGURA 10. Curva de recuperación de partículas.

Agradecimientos

Se agradece al grupo del GREENER de la UMSNH por su colaboración en este proyecto, al Programa Estímulos al Desempeño del Personal Docente, por el apoyo recibido y a la Revista Ciencia Nicolita de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo UMSNH.

Referencias

- ADVANCED MINERAL PROCESSING AMP, HIDROCICLONES
[HTTP://WWW.AMPMINERAL.COM/EQUIPOS/HIDROCICLONES.PHP](http://www.ampmineral.com/equipos/hidrociclones.php)
- ARYAL, SINGH, RAKISH, KAPALI, DHAKAL. 2019 DESIGN, FABRICATION AND TESTING OF HYDROCYCLONE SEPARATOR AS SEDIMENT SEPARATION SYSTEM, 2^N INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND BIOLOGY AT, LALITPUR, NEPAL
- BETANCOURT LAURENCIO, SIERRA PÉREZ, TAMAYO CABALLERO, 2020. DETERMINATION OF THE DESIGN TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF A HYDROCYCLONE FOR SAND WASHING IN THE MAYARI RIVER. *CINAREM. CUBA*.
- BREFF-AZAHAREZ, FALCÓN-HERNÁNDEZ, GÓNGORA-FONSECA, 2014. EVALUACIÓN DE TRABAJO DE UN HIDROCICLÓN PARA LA CLASIFICACIÓN DE LA PULPA DE CIENOS CARBONATADOS. *TECNOLOGÍA QUÍMICA*.
- BUDYNAS NISBETT, 2008, DISEÑO DE INGENIERÍA MECÁNICA SHIGLEY. MC GRAW HILL OCTAVA EDICIÓN. *Pp.983*
- CEMENTOS CIBAO. 2017, ARENA, SUS TIPOS Y SUS CLASIFICACIONES | *CEMENTOS CIBAO*
- DURAN ASCENCIO, 2013, DISEÑO DE UN CICLÓN DE POLVOS METÁLICOS PARA RAPID PROTOTYPING, *TESIS DE LICENCIATURA, UNIVERSIDAD DE SEVILLA, ESPAÑA. PP 6-11*
- MENDOZA, VERA, 2019. ESTUDIO DE DIFERENTES MODELOS DE TURBULENCIA PARA OBTENER LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN PERFIL NACA 2415 MEDIANTE LA SIMULACIÓN TRIDIMENSIONAL DE FLUJOS. *REVISTA BISTUA FAC. DE CIENCIAS BÁSICAS*.
- PEDRAZA HERNÁNDEZ. 2018, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HIDROCICLÓN A NIVEL LABORATORIO, *TESIS DE LICENCIATURA, ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA, UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA TECNOLÓGICA DE COLOMBIA, COLOMBIA*.

RIETEMA, 1961, PERFORMANCE AND DESIGN OF HYDRO CYCLONES-IV, *CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE*, *PP. 320 A 325*.

VESILAND AARNE, 1980, THE ROSIN RAMMLER PARTICLE SIZE DISTRIBUTION, ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY, AMSTERDAM, *PP275-277*