

## ESTUDIO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA EN UN HIDROCICLÓN OPERADO CON AGUA

Lina Chica <sup>1\*</sup>, Oswaldo Bustamante <sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Ph.D (C), Cimex. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia

<sup>2</sup> Ph.D. Profesor Asociado. Cimex. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia

\* Contacto: lmchica@unal.edu.co

### RESUMEN

La clasificación por tamaño es un proceso crítico dentro del procesamiento de minerales. Los hidrociclones son equipos ampliamente usados como separadores por tamaño gracias a su versatilidad y bajos costos de operación. Sin embargo, los modelos existentes para la predicción de su eficiencia son empíricos y dejan de lado consideraciones energéticas que podrían mejorar su operación. Se presentan los resultados experimentales para la disipación de energía en hidrociclones de diámetro pequeño operados con agua. Los resultados obtenidos mostraron que algunas variables de operación - principalmente la presión a la entrada- y variables de diseño como la relación de diámetros de salida  $D_u/D_o$  controlan la disipación de energía mecánica en el hidrociclón, y por lo tanto su eficiencia como separador por tamaños.

**Palabras Clave:** *Hidrociclones, Disipación de energía, Separación por tamaño*

### ABSTRACT

Size separation is a critical stage in mineral processing. Hydrocyclone is a device used in size separation for mineral processing industry, taking advantage of its separation capacity over a range of materials and low maintenance cost. However, many studies attempt to understand size separation phenomenon but none of them has taken an energy point of view. This paper presents the results for mechanical energy dissipation in 100 mm hydrocyclone in only water operation. Results show that operation variables – inlet pressure mainly- and geometrical considerations as diameter relation  $D_u/D_o$  control mechanical energy dissipation in hydrocyclone. That means mechanical energy dissipation influences separation efficiency.

**Keywords:** *Hydrocyclone, Energy dissipation, Size separation*

## 1 INTRODUCCIÓN

Dentro del procesamiento de minerales, la operación clasificación se ha convertido en una etapa fundamental en cualquier planta de beneficio mineral. Los hidrociclones son ampliamente usados en la actualidad como clasificadores por tamaño debido a la sencillez de su operación y su bajo costo de mantenimiento por la ausencia de partes móviles, así como por el amplio espectro de tamaños en los que puede emplearse [1]. Debido a la complejidad del campo de flujo interior, la mayor parte de los modelos que recogen las relaciones entre las variables geométricas y de

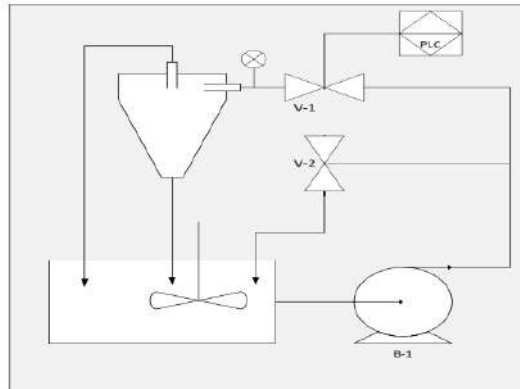
operación en hidrociclones son de origen empírico y se limitan al desarrollo de correlaciones a partir de datos experimentales. Esto significa que se desconocen los fenómenos hidrodinámicos que ocurren en el interior, además de despreciar consideraciones energéticas que podrían retomarse a partir de un balance global alrededor del equipo. Recientemente, los modelos basados en física de fluidos han comenzado a ser utilizados, pero incluyen gran cantidad de simplificaciones y requieren de esquemas de solución numérica que dificultan el procesamiento de los datos en el interior del flujo y aunque se tiene evidencia que la forma de la descarga ( spray o rope) incide en el desempeño del hidrociclón como clasificador, este aspecto no ha sido incluido explícitamente en los modelos existentes para evaluar el desempeño del equipo, a pesar que en la operación industrial se desea un estado de spray cercano al rope para mayor estabilidad, mejor claridad de la separación y más bajo valor de cortocircuito. Por este motivo, para la forma de la descarga y la dinámica de la separación por tamaños, las consideraciones energéticas pueden ser empleadas. En este artículo, se presentan los resultados obtenidos a partir de datos experimentales para la disipación de energía en hidrociclones de diámetro pequeño operados con agua.

## **2 DISIPACIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA EN HIDROCICLONES**

Partiendo de la primera ley de Cauchy y expresando la fuerza de cuerpo como el gradiente de un potencial puede obtenerse que el doble producto interior entre el tensor extra del esfuerzo y el gradiente de velocidad, esto es, el producto  $\mathbf{T}:\nabla\mathbf{v}$ , representa la disipación viscosa  $\dot{E}_v$ . Pocos autores han introducido el concepto de disipación de energía en hidrociclones. Los acercamientos más significativos están asociados a soluciones numéricas de las ecuaciones de Navier Stokes empleando modelos de turbulencia pero sin considerar los efectos del balance de energía sobre la clasificación por tamaños. En ciclones separadores, la primera aproximación al concepto de disipación de energía fue el empleado por Starmaid en la modelación de ciclones de aire. Dai, Li & Chen (1999) reportaron perfiles de la tasa de disipación turbulenta empleando un modelo el  $\kappa$ - $\epsilon$  y pudieron demostrar que la disipación de energía turbulenta depende de cambios en el patrón de flujo al interior del hidrociclón [2]. Posteriormente Liu et al (2005) mostraron que las pérdidas de energía mecánica en un ciclón separador está causada principalmente por la disipación viscosa media [3]. Como concepto asociado a la separación por tamaño, la disipación de energía solo ha sido incluida en el trabajo de Zhao et al (2006) quienes determinan que está enteramente asociada a la diferencia de presión entre la alimentación y las salidas [4]. Así mismo supone que entre menor sea la pérdida de energía el sistema de separación es más eficiente.

## **3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

Se empleó un hidrociclón transparente de 100mm de diámetro. El hidrociclón es de construcción modular lo que permite intercambiar fácilmente la sección cilíndrica y el diámetro de descarga. El esquema del montaje de laboratorio es mostrado en la Figura 1.



**Figura 1.** Diagrama montaje experimental

El sistema de bombeo es controlado a través de un PLC, que empleando una válvula neumática permite el control de presión y/o caudal de entrada. Mientras los efectos de una variable eran analizados, los demás parámetros fueron mantenidos constantes. Para evaluar el desempeño del hidrociclón, el desarrollo experimental consideró variaciones en parámetros de operación y diseño son mostrados en la Tabla 1. En cada corrida se obtuvieron mediciones de caudal para las tres corrientes del hidrociclón, del ángulo de la descarga y del diámetro del núcleo de aire en diferentes posiciones axiales.

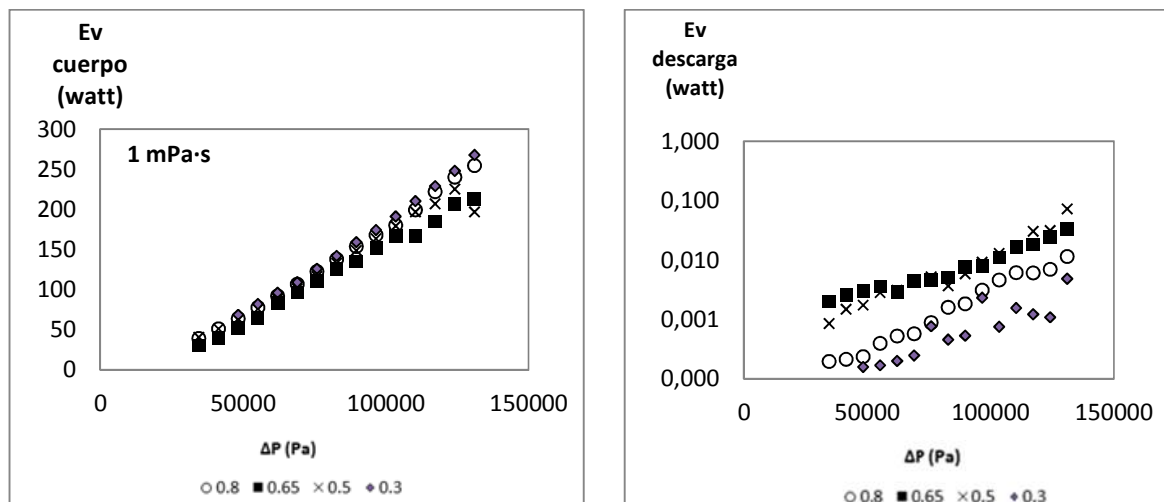
**Tabla 1.** Resumen de condiciones estudiadas

Variable	Valores referencia			
$\frac{H}{D_c}$	7.5	5.5	4.5	
$\frac{d_u}{d_o}$	0.8	0.65	0.5	0.3
Presión (Mpa)	0.03 – 0.14			

## 4 RESULTADOS

A partir de los datos experimentales fue determinada para todas las condiciones estudiadas, la magnitud promedio de la disipación de energía tanto para el rebalse y la descarga, como para el cuerpo del hidrociclón. De los resultados obtenidos es evidente que la disipación de energía generada en el rebalse es muy cercana a cero para todas las corridas experimentales, independiente de la geometría o las condiciones de operación analizadas. Así mismo, la disipación de energía en la descarga es casi despreciable respecto de la disipación de energía en el cuerpo del hidrociclón. Esta diferencia se encuentra es de 3 órdenes de magnitud. Lo anterior significa que en la operación con fluidos newtonianos la disipación de energía en la descarga no controla la operación del equipo. Esto tiene sentido en la operación sin partículas puesto que la fricción del fluido con las paredes y las pérdidas energéticas en la interface fluido-aire son tenidas

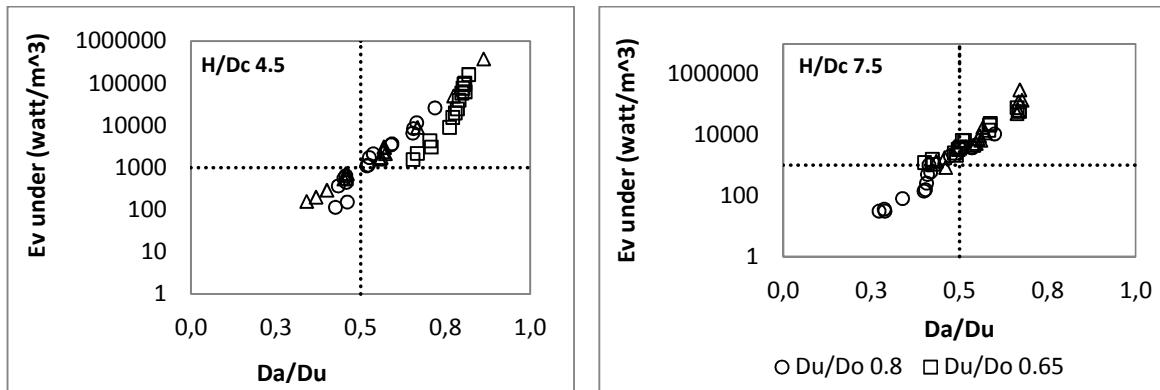
en cuenta al interior del volumen de control seleccionado. Adicionalmente, la disipación que experimenta el fluido justo al llegar a la zona del ápex también es considerada dentro del término disipación de energía interior. Este hecho implica que el término que describe la disipación de energía en la descarga sólo determina la disipación justo en el plano de salida del fluido pero deja de lado los fenómenos disipativos que ocurren en regiones cercanas al ápex, especialmente en la reducción de área que existe debido a que el ángulo de cono es pequeño, como es típico en hidrociclones cónicos convencionales. Así mismo los fenómenos de turbulencia que se experimentan cerca al buscador de vórtice y que han sido descritos en diversos modelos del campo de flujo también aportan a que la disipación en el cuerpo del hidrociclón sea aún mayor. Para respaldar el análisis anterior, la Figura 2 presenta la diferencia en la magnitud de la disipación de energía en el cuerpo del equipo y en la descarga manteniendo fija la altura global del hidrociclón, con cambios tanto en la relación geométrica — como en la viscosidad del fluido alimentado. Los resultados se presentan para el intervalo de presión establecido en el diseño experimental lo cual pone en evidencia un panorama más amplio de la influencia de las variables geométricas y operativas sobre la disipación de energía.



**Figura 2.** Disipación de energía en el interior vs disipación de energía en la descarga. Los resultados mostrados corresponden a un hidrociclón de H=75cm

De los resultados existen algunos puntos importantes que deben discutirse. En primer lugar, es evidente que para cada relación  $\frac{d_{ii}}{d_o}$  la disipación en la descarga crece a expensas de la disminución en la disipación al interior, esto es a menor  $\frac{d_{ii}}{d_o}$  mayor es la disipación de energía en el cuerpo, pero menor en la descarga. En segundo lugar, a pesar que la disipación en la descarga tiene una magnitud pequeña respecto de la disipación global, los resultados obtenidos para esta zona brindan información detallada de la influencia de las variables geométricas sobre la forma de la descarga como se discutirá posteriormente. En tercer lugar, puede discutirse el hecho que la magnitud de la disipación de energía total comienza a ser muy importante en presiones de operación mayores a 130000 Pa. Por otro lado, en la operación solo con agua, pudo determinarse

la existencia de un límite de disipación de energía específica en la descarga, que define la forma de la descarga, si se combina apropiadamente con algunas variables de operación. Los resultados para el diámetro de aire normalizado  $\frac{d_a}{d_u}$ , son muy significativos para entender la transición de *spray* cercano al *rope* bajo consideraciones asociadas a la relación  $\frac{d_u}{d_o}$ . Cuando  $\frac{d_u}{d_o} < 0.3$  sin importar ni las condiciones de operación - esto es presión y viscosidad del alimento - ni la disipación de energía, la descarga siempre es *rope* acorde a las predicciones de (Bustamante, 1991). Cuando  $0.3 < \frac{d_u}{d_o} < 0.8$  la variación de la disipación de energía en la descarga con el diámetro de aire normalizado es una función única si la geometría se mantiene constante. Para todos los casos estudiados en este intervalo de relaciones  $\frac{d_u}{d_o}$ , si la disipación de energía específica en la descarga es inferior a 1000 watt/m<sup>3</sup> esta corresponde a *roping*. Así mismo, para este tipo de descarga se pudo establecer que  $\frac{d_a}{d_u} < 0.5$ , como se indica en la Figura 3. Estos resultados pueden extenderse a la operación a diferentes viscosidades.



**Figura 3.** Control de  $\frac{d_a}{d_u}$  sobre la disipación de energía para diferentes geometrías

Ahora, para la partición de caudales  $\frac{Q_u}{Q_o}$ , fue posible concluir con la operación solo con agua, que existe un intervalo claro que separa la operación en *spray* del *roping*, de acuerdo al límite de disipación de energía específica en la descarga, encontrado anteriormente, así:

$$\frac{Q_u}{Q_o} < 0.2 \text{ rope}$$

$$0.2 < \frac{Q_u}{Q_o} < 0.7 \text{ spray o rope dependiendo de la disipación de energía en la descarga.}$$

$$\frac{Q_u}{Q_o} > 0.7 \text{ spray}$$

## **5 CONCLUSIONES**

Los resultados obtenidos mostraron que algunas variables de operación y variables de diseño como la relación de diámetros de salida  $D_u/D_o$  controlan la disipación de energía mecánica en el hidrociclón. Así mismo, a partir de consideraciones de energía, pudo establecerse la existencia de un límite de disipación de energía que separa las zonas de spray y rope en la descarga, que se asocian con la correcta operación del equipo. Esto implica que, desde la perspectiva energética, pueda desarrollarse un modelo más amplio para el funcionamiento del hidrociclón, capaz de predecir de manera más precisa la eficiencia de la separación, y que desde una mirada fenomenológica pueda explicar el campo de flujo interior.

## **6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. BUSTAMANTE, M. O. Efecto de la geometría de un hidrociclón sobre las condiciones normales de operación. [Msc Tesis.] Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica UdeC, 1991.
2. DAI, G., LI, J., & CHEN, W. Numerical prediction of the liquid flow within a hydrocyclone. *Chemical Engineering Journal* 74 , 217-223, 1999
3. LIU, C., WANG, L., WANG, J., & LUI, Q. Investigation of energy loss mechanisms in cyclone separators. *Chemical Engineering Technology* 28, 1182-1190, 2005
4. ZHAO, L., JIANG MING, H., & SUNDE, Z. Pressure characteristics on a hydrocyclone for fine particle separation. *Journal of Harbin Institute of Technology*. Vol 13, 294 – 298, 2006.
5. Neesse, T., Schneider, M., Dueck, J., Golyk, V., Buntanbanch, S., & Tiefel, H. (2004). Hydrocyclone operation at the transition point rope/spray discharge. *Minerals Engineering* 17, 733-737.