

Universidad del Valle de Guatemala
Facultad de Ingeniería



“Determinación de las condiciones óptimas de operación del
Hidrociclón del Laboratorio de Operaciones Unitarias”

Trabajo de investigación presentado por Juan Carlos López Rosales para optar al
grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala
2008

“Determinación de las condiciones óptimas de operación del
Hidrociclón del Laboratorio de Operaciones Unitarias”

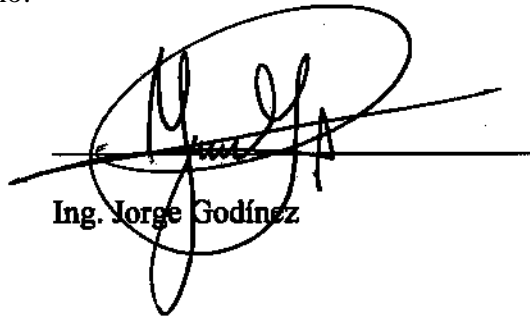
Universidad del Valle de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Química

“Determinación de las condiciones óptimas de operación del
Hidrociclón del Laboratorio de Operaciones Unitarias”

Trabajo de investigación presentado por Juan Carlos López Rosales para optar al
grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

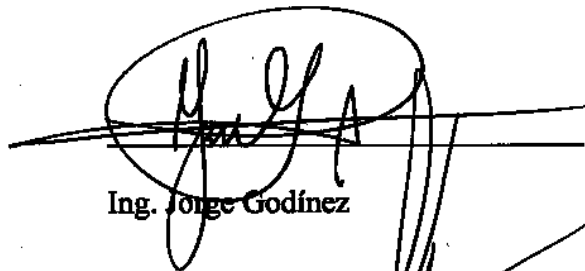
Guatemala
2008

Visto Bueno:

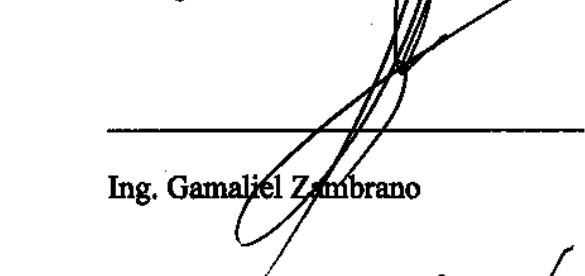


Ing. Jorge Godínez

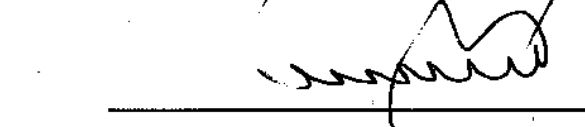
Tribunal:



Ing. Jorge Godínez



Ing. Gamaliel Zambrano



Ing. Oscar Maldonado

29 de enero de 2009

PREFACIO

El hidrociclón es un equipo de mucha utilidad en el campo de la ingeniería química, la industria petrolera y la minería; es un equipo que funciona con un principio simple y que puede llegar a ser sumamente eficiente; al mismo tiempo, es un equipo del que se menciona muy poco en los cursos de ingeniería química. Recientemente, a modo de tener un mayor acercamiento con el equipo mencionado, el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala adquirió un hidrociclón marca KS, modelo KS 80E. Este trabajo fue elaborado debido a la necesidad de poner en funcionamiento y evaluar dicho hidrociclón, para esto se diseñó y se realizó una serie de experimentos que permitieron medir el desempeño del mismo. Todas las operaciones y experimentos descritos en este trabajo fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala bajo la asesoría y supervisión del Ing. Jorge Emilio Godínez.

ÍNDICE

	Página
PREFACIO	vi
LISTA DE CUADROS	viii
LISTA DE GRÁFICOS	ix
RESUMEN	x
Capítulos	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	2
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
IV. OBJETIVOS	7
V. ANÁLISIS DE PRUEBAS INICIALES	8
VI. METODOLOGÍA	14
VII. RESULTADOS	16
VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	21
IX. CONCLUSIONES	25
X. RECOMENDACIONES	26
XI. MANUAL DE OPERACIÓN	27
XII. BIBLIOGRAFÍA	30
XIII. APÉNDICE	31

LISTA DE CUADROS

CUADRO	Página
1. Caudal sin espita	8
2. Caudal con espita de 0.6350 cm (1/4'')	9
3. Caudal con espita de 0.3175 cm (1/8'')	11
4. Clasificación de arroz molido	12
5. Experimentos a realizar	12
6. Peso de arroz y volumen de agua para corridas sin espita	14
7. Peso de arroz y volumen de agua para corridas con espita de 0.6350 cm (1/4'')	14
8. Eficiencia total basada en la recuperación de sólidos	20
9. Penetración total (eficiencia total fina)	20
10. Selección de espita	27
11. Peso de arroz y volumen de agua para corridas sin espita	33
12. Peso de arroz y volumen de agua para corridas con espita de 0.6350 cm (1/4'')	33
13. Masa recuperada en 20 litros de sobreflujo de cada operación	33
14. Concentración inicial	34
15. Concentración del sobreflujo	34
16. Concentración del subflujo	34
17. Eficiencia total basada en la recuperación de sólidos	35
18. Penetración total (eficiencia total fina)	36
19. Cotización de Bombas	40
20. Costo total del equipo	40

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO	Página
1. Separación dentro del hidrociclón	2
2. Entradas y salidas del hidrociclón	3
3. Caudal sin espita, 2 cm de diámetro de salida	9
4. Caudal con espita de 0.6350 cm (1/4'') de diámetro de salida	10
5. Caudal con espita de 0.3175 cm (1/8'') de diámetro de salida	11
6. Espita de 0.6350 cm (1/4''), vista frontal-superior	16
7. Espita de 0.6350 cm (1/4''), vista frontal-inferior	17
8. Espita de 0.6350 cm (1/4''), vista frontal con cotas	17
9. Espita de 0.3175 cm (1/8''), vista frontal-superior	18
10. Espita de 0.3175 cm (1/8''), vista frontal-inferior	19
11. Espita de 0.3175 cm (1/8''), vista frontal con cotas	19
12. Diagrama del equipo	31
13. Fotografía del equipo	32
14. Caída de presión del hidrociclón según caudal	37

RESUMEN

En este trabajo se presenta el dimensionamiento de una bomba que permita operar el hidrociclón marca KS, modelo KS 80E recientemente adquirido por el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, así como también el diseño de dos espitas que permitan variar el diámetro de salida de subflujo de dicho hidrociclón, mejorando el rendimiento del mismo. Se presentan también resultados obtenidos a partir de operaciones de clarificación y clasificación efectuadas con el hidrociclón, resultados acerca de la eficiencia total basada en la recuperación de sólidos y de la penetración total (eficiencia total fina).

Hasta antes de la realización de este trabajo, el hidrociclón no había sido utilizado, por lo que se desconocía su desempeño. Se operó el hidrociclón con mezclas de agua con arroz molido y se midió durante dichas operaciones la concentración de los sólidos tanto en la entrada como en las salidas, lo que permitió evaluar la eficiencia del hidrociclón mediante cálculos basados en la recuperación de sólidos. Las operaciones efectuadas fueron de clarificación y de clasificación, de las cuales se evaluó la eficiencia total basada en la recuperación de sólidos (E_T) y la penetración total (eficiencia total fina) (P_T).

I. INTRODUCCIÓN

El hidrociclón, un equipo estudiado brevemente en los cursos de Manejo de Sólidos y de Transferencia de Masa, es una unidad que permite realizar operaciones que caen en las categorías de separaciones de dos fases con el líquido como medio de suspensión: clarificación de líquidos, espesamiento de lodos, lavado de sólidos, desgasificación de líquidos y clasificación de sólidos por densidad o forma de partícula, entre otras. Recientemente el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala adquirió un hidrociclón marca KS, modelo KS 80E. En este trabajo se evaluó algunos parámetros de desempeño del mismo: el tipo de mezclas que puede operar, la carga que puede manejar, el caudal con el que maneja dicha carga y el rendimiento obtenible. Se operó el hidrociclón con mezclas de distinto tamaño de sólidos, con distintos caudales, y se midió durante dichas operaciones las concentraciones de los sólidos tanto en la entrada como en la salida, lo que permitió evaluar la eficiencia del hidrociclón mediante cálculos basados en la recuperación de sólidos. Se efectuaron operaciones de clarificación y de clasificación, de las cuales se evaluó la eficiencia total basada en la recuperación de sólidos (E_T) y la penetración total (eficiencia total fina) (P_T).

Debido a que la bomba inicialmente instalada con el equipo era insuficiente para hacerlo operar adecuadamente, se dimensionó una nueva bomba que sí pueda hacerlo. También se diseñó y se fabricó dos espigas para reducir el diámetro de salida del subflujo del hidrociclón, lo que puede permitir variar el rendimiento del equipo.

II. MARCO TEÓRICO

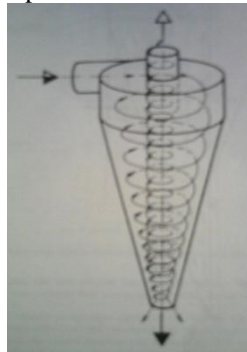
A. Hidrociclones

El principio y diseño básico del hidrociclón convencional tiene más de 100 años de antigüedad (patentado por primera vez en 1891), pero no se le encontró una aplicación relevante en la industria hasta después de la Segunda Guerra Mundial. Primero en el procesamiento de minerales y minería en general, pero después se fue ampliando hacia la industria química, petroquímica, textil, generación de electricidad y metalurgia, entre otros. Los hidrociclones están ahora bien establecidos y su campo de aplicación sigue creciendo. (Svarovsky, 1984: 1)

Las aplicaciones de los hidrociclones en la industria caen en las amplias categorías de separaciones de dos fases con el líquido como medio de suspensión: clarificación de líquidos, espesamiento de lodos, lavado de sólidos, desgasificación de líquidos y clasificación de sólidos por densidad o forma de partícula. Algunos hidrociclones con adaptaciones especiales pueden ser utilizados incluso para separar dos líquidos inmiscibles, tales hidrociclones pueden separar aceite de agua. Cada de las aplicaciones listadas anteriormente tiene sus requerimientos y metas particulares, y necesitan cambios en el diseño y operación del hidrociclón a emplear en cada caso. (Svarovsky, 1984: 1)

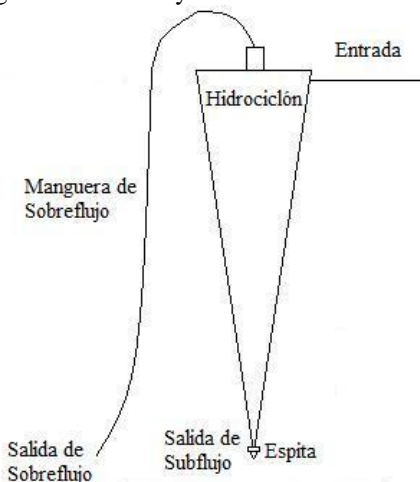
El hidrociclón es un separador estático basado en la separación centrífuga en un vórtice generado dentro de un cuerpo cono-cilíndrico. El flujo de alimentación entra tangencialmente al hidrociclón por la parte superior y sale dividido en dos flujos: el *subflujo*, el cual contiene la mayoría de sólidos (o al menos la fracción más pesada) suspendidos en algo de líquido, y el *sobreflujo*, el cual contiene la mayor parte del líquido y los sólidos más finos. La separación depende del tamaño de las partículas y el tamaño característico de la separación se llama *tamaño de corte*. (Svarovsky, 1984: 1)

Figura 1. Separación dentro del hidrociclón



(Svarovsky, 1984: 31)

Figura 2. Entradas y salidas del hidrociclón



Las principales ventajas de los hidrociclones son las siguientes:

- Son extremadamente versátiles, tienen múltiples aplicaciones.
- Son simples, baratos, fáciles de instalar y operar, requiriendo además de poco mantenimiento.
- Son pequeños, en comparación con otro tipo de separadores, ahorrando espacio y tiempo de residencia.
- La existencia de fuerzas en sus corrientes internas es una ventaja en la clasificación de sólidos ya que rompen aglutinamientos de partículas. (Svarovsky, 1984: 2)

Las principales desventajas de los hidrociclones son que:

- Son inflexibles en términos de operación, es decir, su desempeño depende del flujo, no de ajustes hechos al hidrociclón.
- Tienen una eficiencia muy limitada, aunque mejorable con arreglos de varias etapas.
- Son susceptibles de abrasión.
- Las mismas fuerzas en sus corrientes, enumeradas como ventajas, impiden el uso de floculantes para optimizar la separación. (Svarovsky, 1984: 2)

1. **Eficiencia de separación.** La separación sólido-líquido nunca se lleva a cabo por completo en los hidrociclones. Sistemáticamente son inevitables las imperfecciones en la separación: algo de sólidos escapa con el sobreflujo y algo de líquido es descargado con los sólidos en el subflujo. De hecho, los sólidos siempre se descargan en forma de lodo, a concentraciones raramente mayores al 50% en volumen, y usualmente mucho menos. La eficiencia de separación es usualmente definida y medida separadamente para cada una de las dos fases involucradas: separación de sólidos y separación de líquidos. El término eficiencia en este caso es usado para referirse a la habilidad del separador para recuperar sólidos en el subflujo, como es requerido en tareas de espesamiento y clarificación. (Svarovsky, 1984: 12)

2. Eficiencia total basada en la recuperación de sólidos. La eficiencia total basada en la recuperación de sólidos es simplemente la relación de la masa recuperada en el subflujo entre la masa de alimentada.

$$E_T = \frac{M_c}{M} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

E_T = Eficiencia Total

M_c = Masa Recuperada En Subflujo

M = Masa en la Alimentación (Svarovsky, 1984: 13)

Si no hay acumulación de sólidos en el hidrociclón se puede determinar la eficiencia total a partir de un balance de masa general:

$$F(x) = E_T \cdot F_c(x) + (1 - E_T) \cdot F_f(x) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Despejando, E_T queda como:

$$E_T = \frac{F - F_f}{F_c - F_f} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

F = Concentración (% masa) en la Alimentación

E_T = Eficiencia Total

F_c = Concentración (% masa) en el Subflujo

F_f = Concentración (% masa) en el Sobreflujo (Svarovsky, 1984: 14)

3. Eficiencia total reducida (número de clarificación). En ciertas aplicaciones de separación sólido-líquido, cuando se tiene un apreciable y relativamente diluido subflujo, como en el caso de los hidrociclones, la eficiencia total definida en la ecuación (1) incluye el efecto de la división de flujo (o “flux muerto”). Esto da como resultado un cierto valor de eficiencia “garantizada”, la cual es siempre alcanzada, independientemente de que el hidrociclón separe los sólidos o no. Esto se debe a funciones para separadores, como divisiones de flujo, y también a que se dividen los sólidos en, por lo menos, la misma proporción que la dada por la relación subflujo/entrada (U/Q). Se conocen diferentes definiciones de eficiencia si se desea considerar el efecto de separación por separado y abstraer la contribución del flux muerto. La mejor y más ampliamente utilizada es la llamada eficiencia “reducida” E'_T dada por la fórmula:

$$E'_T = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \quad (\text{Ecuación 4})$$

donde R_f es la relación subflujo/entrada definida como:

$$R_f = \frac{U}{Q} \quad (\text{Ecuación 5})$$

La ecuación (4) satisface los requerimientos básicos de una ecuación definición de eficiencia ya resulta en cero cuando no se lleva a cabo ninguna separación ($E_T = R_f$) o resulta en la unidad para una separación completa. Nótese que la eficiencia reducida E'_T es idéntica al número de clarificación usado en filtración. (Svarovsky, 1984: 15)

4. Penetración total (eficiencia total fina). Esta es usada por razones de conveniencia matemática o de interés en el producto fino, en este caso los sólidos que salen en el sobreflujo. La penetración total se define simplemente como:

$$P_T = 1 - E_T \quad (\text{Ecuación 6})$$

En algunas aplicaciones industriales como clasificación de polvos o procesamiento de minerales, donde los sólidos finos en el sobreflujo representan el producto, la penetración total P_T es a veces confusamente referida como “recuperación”. (Svarovsky, 1984: 15)

5. Diámetro de salida de subflujo y espitas. Solamente los hidrociclones especializados cuentan con un diámetro de salida predeterminado para el subflujo, la mayoría de hidrociclones comerciales cuentan con uno variable. Esto se debe a que dicho diámetro no puede ser predicho de manera certera y su ajuste es vital para el óptimo funcionamiento del hidrociclón. El diámetro de salida del subflujo afecta directamente la concentración de sólidos, tanto en el subflujo como en el sobreflujo, y afecta también el tamaño de corte (tamaño de partícula que tiene un 50% de probabilidad de ser separada por el sobreflujo o de continuar salir por el subflujo). (Svarovsky, 1984: 74)

El diámetro de salida del subflujo resulta más eficiente si se ajusta una vez operada la operación, conforme cambien las condiciones de la misma. Existen varias opciones para hacer este ajuste: espitas intercambiables, aperturas ajustables mecánicamente, neumáticamente o hidráulicamente, o incluso, orificios autoajustables, los cuales mantienen constantes la densidad y concentración del subflujo. Las espitas intercambiables son la opción más comúnmente usada, éstas pueden ser, en algunos casos, reemplazadas sin interrumpir la operación. (Svarovsky, 1984: 74)

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente se desconocen los parámetros de desempeño del hidrociclón marca KS, modelo KS 80E: el tipo de mezclas que puede operar, la carga que puede manejar, el caudal con el que maneja dicha carga y el rendimiento obtenible. Se pretende operar el hidrociclón con mezclas de distinto tamaño de sólidos, con distintos caudales, midiendo durante dichas operaciones las concentraciones de los sólidos tanto en la entrada como en la salida, lo que permitirá evaluar la eficiencia del hidrociclón mediante cálculos basados en la recuperación de sólidos. Con este trabajo se busca también establecer el uso del hidrociclón como una práctica regular en los cursos de Laboratorio de Operaciones Unitarias 1 y 2, de esta forma se puede contar con una práctica más, que podrá ser efectuada por los estudiantes y que les ayudará a comprender los principios que rigen el funcionamiento del hidrociclón, un equipo estudiado en los cursos de Manejo de Sólidos y de Transferencia de Masa.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivos generales

1. Determinar la eficiencia del hidrociclón del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala bajo distintas condiciones de operación.

B. Objetivos específicos

1. Dimensionar la bomba requerida para operar el hidrociclón marca KS, modelo KS 80E.
2. Diseñar espitas con distintos diámetros de salida que permitan trabajar con distintos tamaños de sólidos.
3. Determinar la eficiencia del hidrociclón en cada experimento de clarificación y clasificación realizado.
4. Elaborar un manual de operación del equipo.

V. ANÁLISIS DE PRUEBAS INICIALES

Antes de iniciar con la fase de experimentación se hizo correr agua a través del equipo para probar el funcionamiento de la bomba, verificar que no hubiera fugas en todo el sistema y medir el caudal con el que se podría trabajar. A partir de las pruebas iniciales y de la evaluación del equipo con el que se contaba se realizó el siguiente análisis:

A. Determinación del tipo de sólidos y mezclas utilizables

Debido a que se contaba con una bomba centrífuga, la cual no es adecuada para manejar lodos y que limitaba significativamente el tipo y la cantidad de sólidos que se pueden utilizar, se buscó sólidos poco abrasivos y se decidió utilizarlos en mezclas a muy baja concentración para evitar dañar la bomba. Finalmente se decidió trabajar con arroz molido debido a sus características, su disponibilidad y su precio.

B. Determinación del caudal de operación

Para establecer los caudales de operación se utilizó una bomba centrífuga de 2238 W (3 hp). Se determinó el caudal que pasa a través del hidrociclón haciendo corridas con agua y cerrando parcialmente la llave de globo 1 (Ver Figura 12, Apéndice, página 31). Se hizo de esta manera ya que la llave 1 se puede utilizar para regular el caudal hacia el hidrociclón. El caudal se determinó para las 2 espitas y para cuando no se utiliza ninguna, los caudales registrados son los siguientes:

Tabla 1. Caudal sin espita, 2 cm de diámetro de salida

Caudal sin espita								
Apertura Llave 1 (%)	Q (L/s)	±	Q (L/min)	±	Q prom (L/s)	±	Q prom (L/min)	±
100 % abierta	1.2676	0.0091	76.0563	0.5449	1.2672	0.0126	76.0349	0.7551
	1.2669	0.0087	76.0135	0.5228				
70 % abierta	1.0553	0.0086	63.3166	0.5136	1.1052	0.0123	66.3135	0.7398
	1.1552	0.0088	69.3103	0.5309				
40 % abierta	1.3626	0.0114	81.7582	0.6834	1.3613	0.0154	81.6791	0.9239
	1.3600	0.0104	81.6000	0.6218				
25 % abierta	1.8841	0.0155	113.0435	0.9293	1.8567	0.0225	111.3998	1.3475
	1.8293	0.0162	109.7561	0.9739				

Continuación Tabla 1

Caudal sin espita								
Apertura Llave 1 (%)	Q (L/s)	±	Q (L/min)	±	Q prom (L/s)	±	Q prom (L/min)	±
10 % abierta	1.8293	0.0162	109.7561	0.9739	1.8500	0.0243	111.0005	1.4598
	1.8707	0.0182	112.2449	1.0895				
Cerrada	2.5188	0.0210	151.1278	1.2628	2.4889	0.0311	149.3344	1.8656
	2.4590	0.0228	147.5410	1.3702				

Figura 3. Caudal sin espita, 2 cm de diámetro de salida

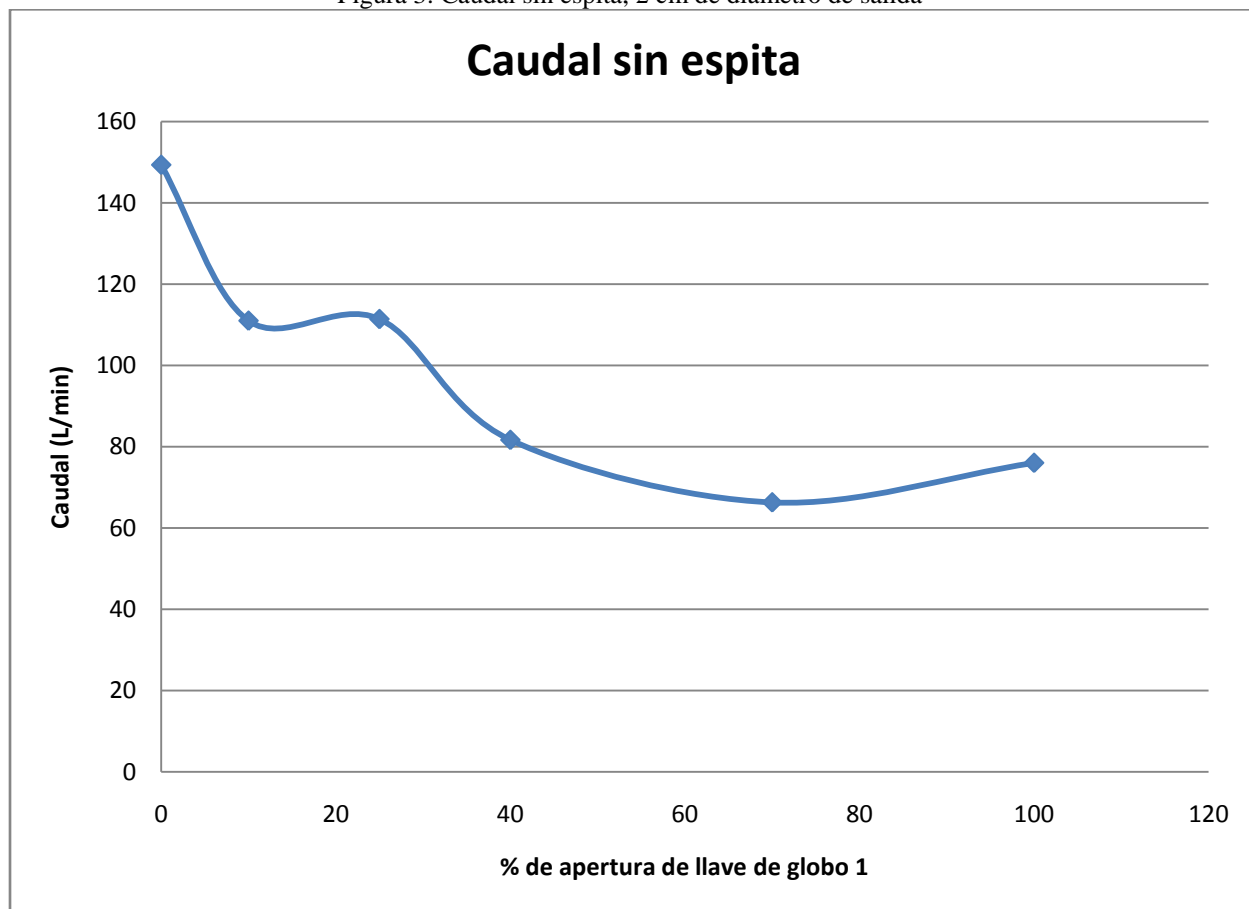


Tabla 2. Caudal con espita de 0.6350 cm (1/4'') de diámetro de salida

Caudal con espita de 0.6350 cm (1/4'')								
Apertura Llave 1 (%)	Q (L/s)	±	Q (L/min)	±	Q prom (L/s)	±	Q prom (L/min)	±
100 % abierta	1.1918	0.0096	71.5084	0.5743	1.1899	0.0132	71.3925	0.7929
	1.1879	0.0091	71.2766	0.5467				

Continuación Tabla 2

Caudal con espita de 0.6350 cm (1/4'')								
Apertura Llave 1 (%)	Q (L/s)	±	Q (L/min)	±	Q prom (L/s)	±	Q prom (L/min)	±
70 % abierta	1.1340	0.0106	68.0412	0.6343	1.1920	0.0147	71.5206	0.8810
	1.2500	0.0101	75.0000	0.6040				
40 % abierta	1.3682	0.0129	82.0896	0.7737	1.3572	0.0170	81.4294	1.0183
	1.3462	0.0111	80.7692	0.6639				
25 % abierta	1.7208	0.0172	103.2468	1.0301	1.8135	0.0235	108.8081	1.4074
	1.9062	0.0157	114.3695	0.9415				
10 % abierta	1.8349	0.0163	110.0917	0.9773	1.8559	0.0237	111.3566	1.4243
	1.8770	0.0173	112.6214	1.0370				
Cerrada	2.5279	0.0208	151.6729	1.2497	2.5051	0.0287	150.3045	1.7235
	2.4823	0.0198	148.9362	1.1877				

Figura 4. Caudal con espita de 0.6350 cm (1/4'') de diámetro de salida

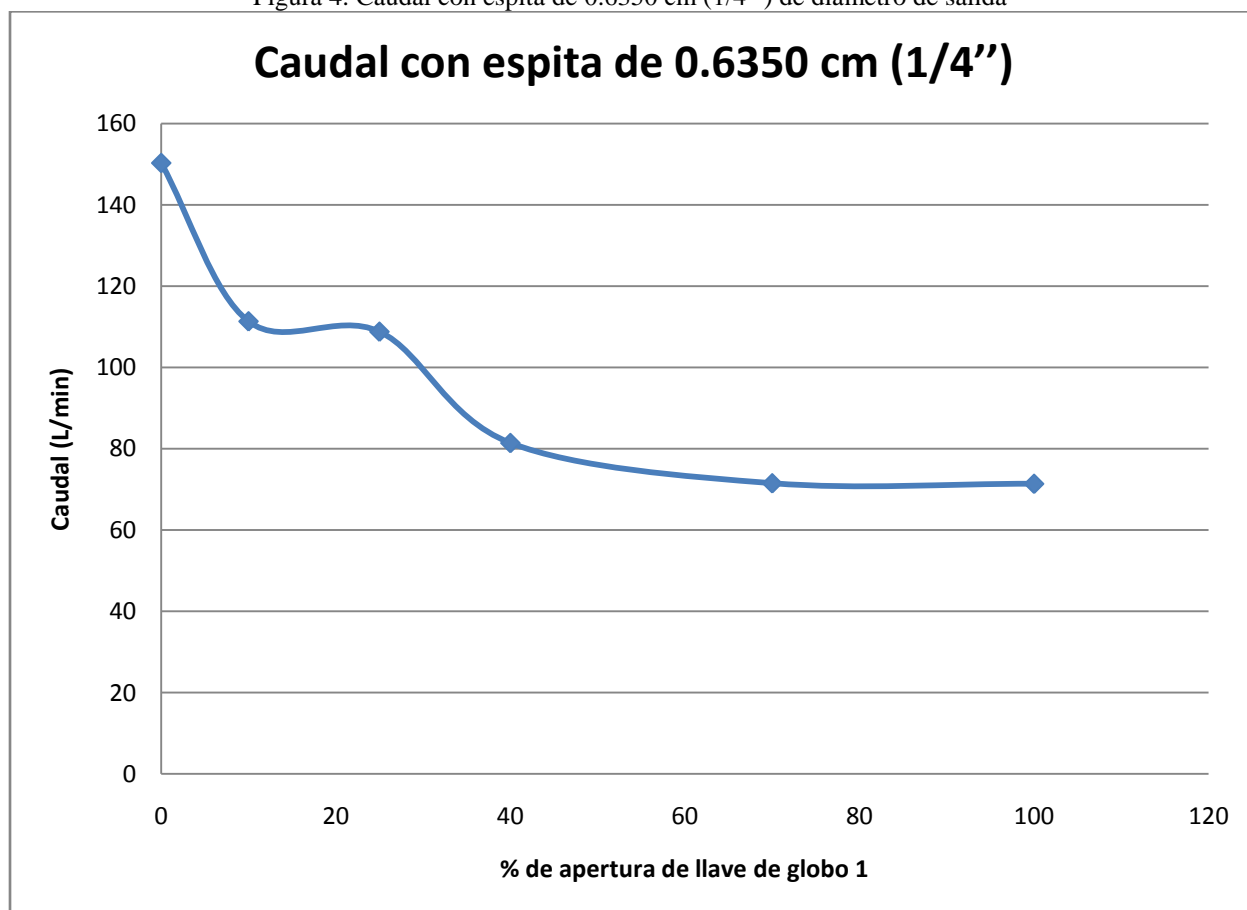
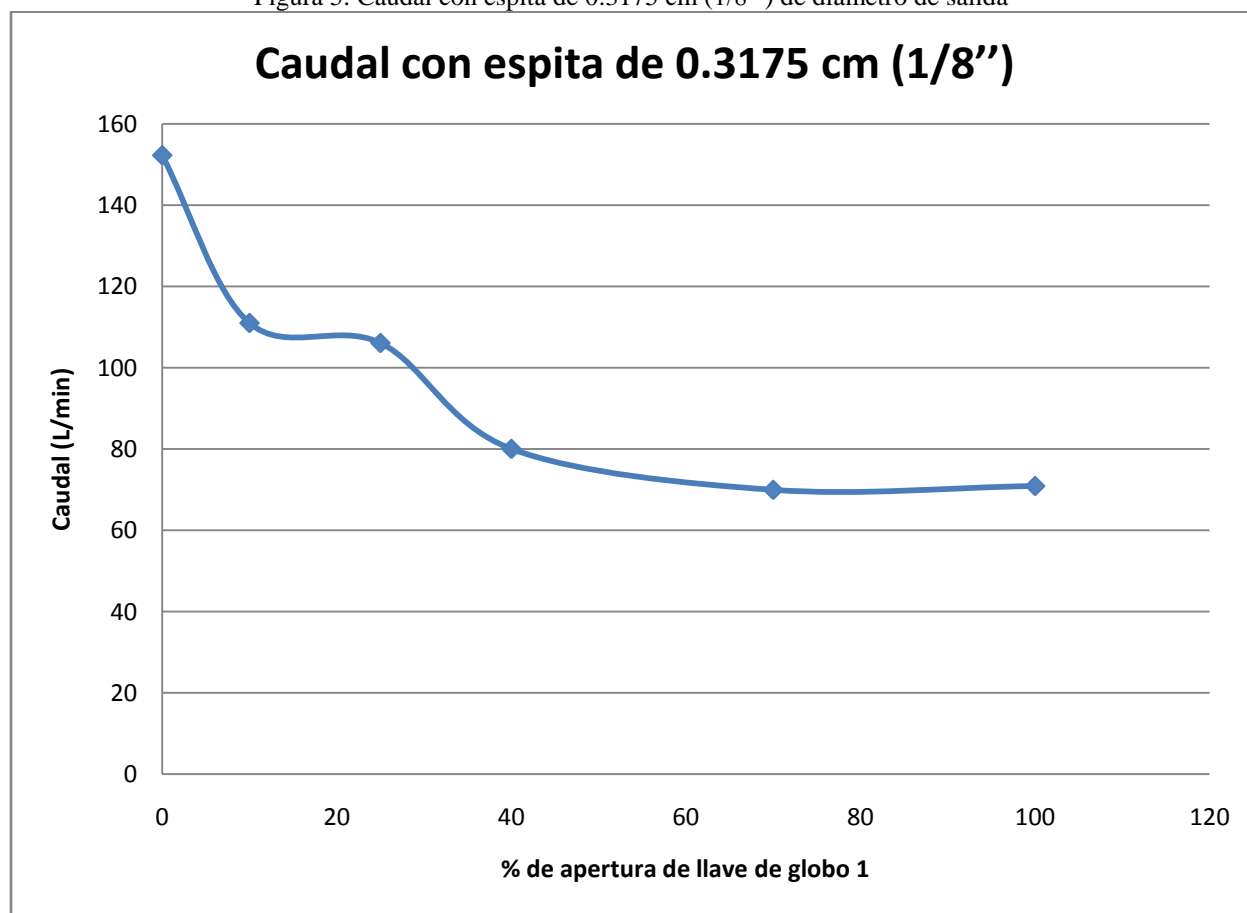


Tabla 3. Caudal con espita de 0.3175 cm (1/8'') de diámetro de salida

Caudal con espita de 0.3175 cm (1/8'')								
Apertura Llave 1 (%)	Q (L/s)	±	Q (L/min)	±	Q prom (L/s)	±	Q prom (L/min)	±
100 % abierta	1.1830	0.0095	70.9797	0.5698	1.1813	0.0131	70.8772	0.7868
	1.1796	0.0090	70.7746	0.5427				
70 % abierta	1.1523	0.0100	69.1406	0.6013	1.1655	0.0140	69.9315	0.8400
	1.1787	0.0098	70.7224	0.5860				
40 % abierta	1.3287	0.0121	79.7203	0.7236	1.3335	0.0178	80.0117	1.0668
	1.3384	0.0131	80.3030	0.7842				
25 % abierta	1.7666	0.0167	105.9937	1.0037	1.7675	0.0239	106.0515	1.4333
	1.7685	0.0171	106.1093	1.0232				
10 % abierta	1.8447	0.0172	110.6796	1.0348	1.8495	0.0247	110.9689	1.4809
	1.8543	0.0177	111.2583	1.0595				
Cerrada	2.5283	0.0211	151.6981	1.2686	2.5372	0.0296	152.2328	1.7757
	2.5461	0.0207	152.7675	1.2423				

Figura 5. Caudal con espita de 0.3175 cm (1/8'') de diámetro de salida



C. Determinación del equipo faltante para el funcionamiento de la unidad

Por el uso que se le va a dar, los materiales a utilizar y las condiciones físicas del equipo, se determinó que para operar el hidrociclón se necesita una bomba lobular de 1492 W (2 hp) Se determinó también que para mejorar el rendimiento del sistema hacían falta espitas para reducir el diámetro de salida del subflujo por lo que se decidió diseñar y mandar a fabricar 2 distintas, una de 0.6350 cm (1/4") de diámetro de salida y otra de 0.3175 cm (1/8") de diámetro de salida.

D. Diseño de los experimentos a realizar

Para las distintas pruebas a realizar se molió 16 kilogramos de arroz, el arroz molido se clasificó con un tamizador marca Tyler en tres distintos rangos de tamaño. Se obtuvo la siguiente clasificación:

Tabla 4. Clasificación de arroz molido

Grano	Diámetro (μm)	Cantidad (Kg)	\pm
Grueso	más de 600	8.0	0.1
Mediano	600-250	6.5	0.1
Fino	menos de 250	1.5	0.1

El grano fino se utilizó junto con el grueso, para hacer pruebas de clasificación por tamaño. Los experimentos realizados fueron los siguientes:

Tabla 5. Experimentos a realizar

Grano	Operación	Espita	Corrida
Grueso (diámetro mayor a 600 μm)	Clarificación	Sin Espita	Corrida 1
			Corrida 2
		Espita 0.6350 cm (1/4")	Corrida 1
			Corrida 2
		Espita 0.3175 cm (1/8")	Corrida 1
			Corrida 2
Mediano (diámetro entre 600 y 250 μm)	Clarificación	Sin Espita	Corrida 1
			Corrida 2
		Espita 0.6350 cm (1/4")	Corrida 1
			Corrida 2
		Espita 0.3175 cm (1/8")	Corrida 1
			Corrida 2

Continuación Tabla 5

Grano	Operación	Espita	Corrida
Fino-Grueso (diámetro menor a 250 μm)	Clasificación	Sin Espita	Corrida 1
			Corrida 2
		Espita 0.6350 cm (1/4")	Corrida 1
			Corrida 2
		Espita 0.3175 cm (1/8")	Corrida 1
			Corrida 2

Para cada corrida se calculó la eficiencia total basada en la recuperación de sólidos (E_T) y la penetración total (eficiencia total fina) (P_T).

VI. METODOLOGÍA

A. Preparación de mezclas

Las mezclas de agua y arroz molido fueron preparadas en cubetas de 40 litros, se colocó en las cubetas la cantidad de arroz requerida y se aforó con agua, después se agitó la mezcla con una paleta. Las cantidades de agua y arroz molido para cada mezcla fueron las siguientes:

Tabla 6. Peso de arroz y volumen de agua para corridas sin espita

		Sin Espita							
		Corrida 1				Corrida 2			
Operación	Grano	Peso (Kg)	±	Vol. (L)	±	Peso (Kg)	±	Vol. (L)	±
Clarificación	Grueso	1.0000	0.0001	40	0.5	1.0000	0.0001	40	0.5
Clarificación	Mediano	1.0000	0.0001	40	0.5	1.0000	0.0001	40	0.5
Clasificación	Grueso-Fino*	0.7500	0.0001	40	0.5	0.7327	0.0001	40	0.5

*El peso de la operación de clasificación corresponde solamente al grano fino, para esta operación también se utilizó 1.0000 Kg \pm 0.0001 de grano grueso (Ver Discusión de Resultados, página 20).

Tabla 7. Peso de arroz y volumen de agua para corridas con espita de 0.6350 cm (1/4")

		Espita de 0.6350 cm (1/4")							
		Corrida 1				Corrida 2			
Operación	Grano	Peso (Kg)	±	Vol. (L)	±	Peso (Kg)	±	Vol. (L)	±
Clarificación	Grueso	-	-	-	-	-	-	-	-
Clarificación	Mediano	1.0000	0.0001	40	0.5	1.0000	0.0001	40	0.5
Clasificación	Grueso-Fino*	-	-	-	-	-	-	-	-

B. Operación del equipo

Las operaciones de clarificación y de clasificación se llevaron a cabo de la misma manera: primero se cargó el depósito del equipo con la mezcla preparada, después, verificando que las llaves de globo 1 y 2 (Ver Diagrama del equipo, Apéndice, página 29) estuvieran totalmente abiertas, se arrancó la bomba, posteriormente se mantuvo lo más constante posible el caudal del sobreflujo, esto se logró cerrando poco a poco la llave de globo 1 conforme transcurría la operación y se recolectaba el sobreflujo.

C. Toma de muestra

Conforme transcurría la operación se recolectaban 20 litros de sobreflujo en una cubeta de 40 litros. Al contar con los 20 litros de sobreflujo se detenía la operación.

D. Tratamiento de la muestra

Los 20 litros de muestra recolectada se filtraban en una manta en la cual quedaban atrapados los sólidos de la mezcla, estos sólidos se colocaron en beakers de 1 litro y se pusieron a secar en el gabinete del equipo de Transferencia de Calor del Laboratorio de Operaciones Unitarias. Una vez secos los sólidos se procedió a pesarlos, el peso obtenido corresponde a los sólidos presentes en 20 litros de sobreflujo, la diferencia con el peso inicial corresponde entonces a los sólidos presentes en el subflujo.

VII. RESULTADOS

A. Dimensionamiento de la bomba requerida para operar el hidrociclón

Por el uso que se le va a dar y las condiciones físicas del sistema, se calculó que la bomba requerida para operar el hidrociclón es una bomba lobular de 1492 W (2 hp).

B. Diseño de espitas con distintos diámetros de salida

1. Espita de 0.6350 cm (1/4") de diámetro de salida. Esta espita de acero inoxidable reduce el diámetro de salida del hidrociclón hasta 0.635 cm, el diámetro de salida del hidrociclón sin espita es de 2 cm. Esta espita es recomendable para partículas con un diámetro de entre 100 μm y 600 μm .

Figura 6. Espita de 0.6350 cm (1/4"), vista frontal-superior

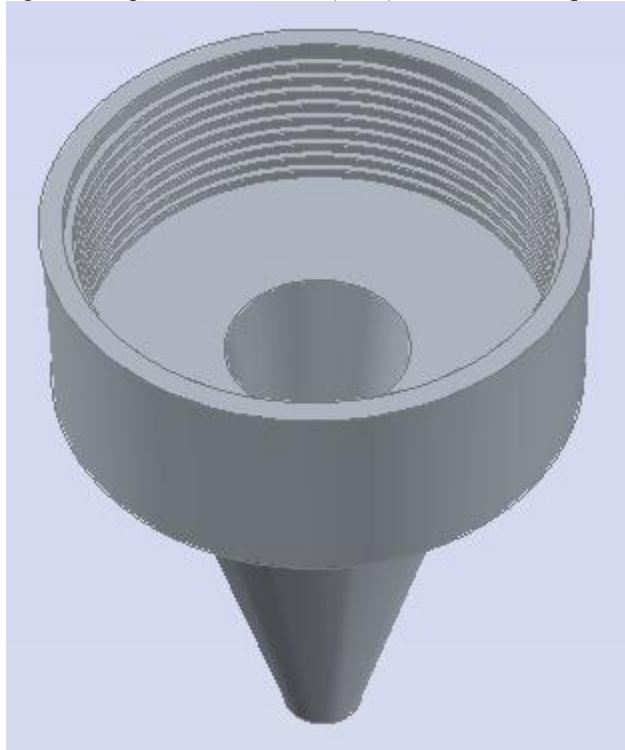


Figura 7. Espita de 0.6350 cm (1/4"), vista frontal-inferior

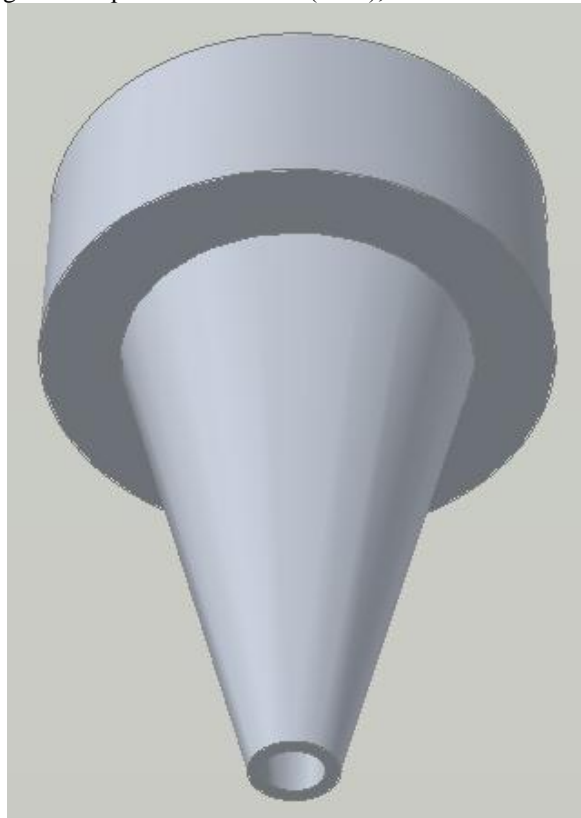
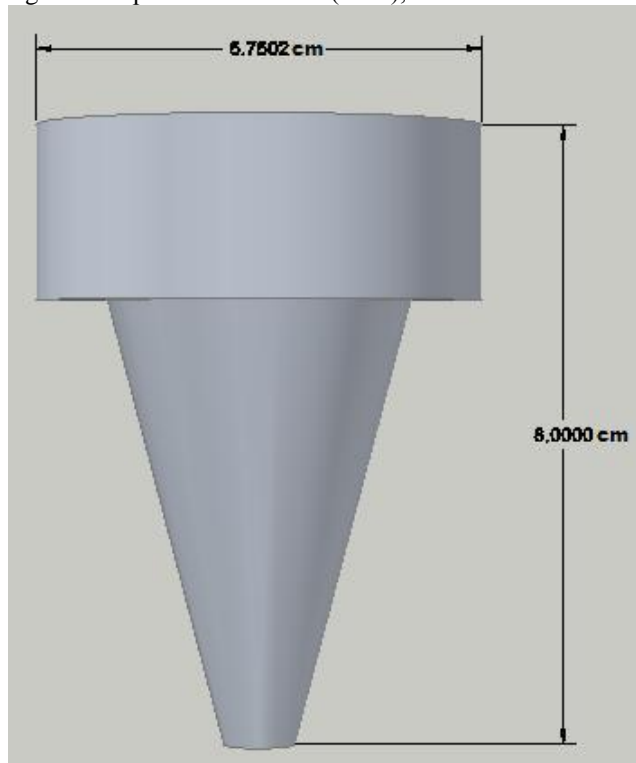


Figura 8. Espita de 0.6350 cm (1/4"), vista frontal con cotas



2. Espita de 0.3175 cm (1/8'') de diámetro de salida. Esta espita de acero inoxidable reduce el diámetro de salida del hidrociclón hasta 0.3175 cm, el diámetro de salida del hidrociclón sin espita es de 2 cm. Esta espita es recomendable para partículas con un diámetro menor a 100 μm .

Figura 9. Espita de 0.3175 cm (1/8''), vista frontal-superior

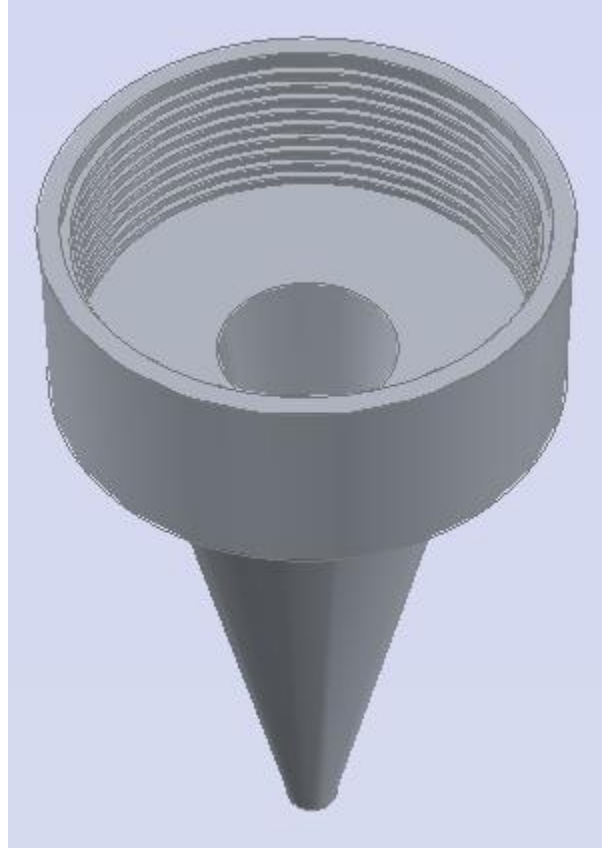
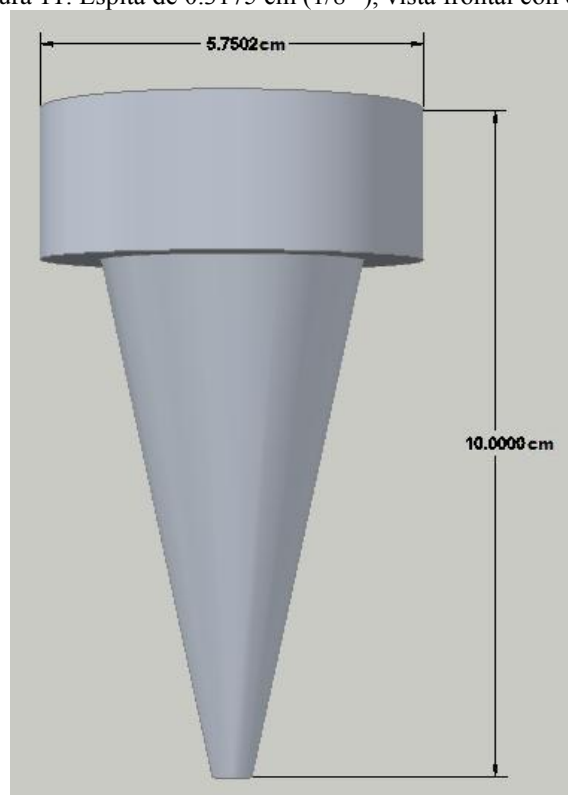


Figura 10. Espita de 0.3175 cm (1/8''), vista frontal-inferior



Figura 11. Espita de 0.3175 cm (1/8''), vista frontal con cotas



C. Determinación de la eficiencia del hidrociclón en cada experimento realizado

1. Eficiencia total basada en la recuperación de sólidos (E_T)

Tabla 8. Eficiencia total basada en la recuperación de sólidos

Eficiencia total basada en la recuperación de sólidos (%)				
Grano	Operación	Espita	E_T promedio	\pm
Grueso (diámetro mayor a 600 μm)	Clarificación	Sin Espita	99.8801	0.0118
		Espita 0.6350 cm (1/4")	-	-
		Espita 0.3175 cm (1/8")	-	-
Mediano (diámetro entre 600 y 250 μm)	Clarificación	Sin Espita	99.8534	0.0096
		Espita 0.6350 cm (1/4")	99.8770	0.0115
		Espita 0.3175 cm (1/8")	-	-
Fino-Grueso* (diámetro menor a 250 μm)	Clasificación	Sin Espita	83.1725	0.0001
		Espita 0.6350 cm (1/4")	-	-
		Espita 0.3175 cm (1/8")	-	-

*La eficiencia total de la operación de clasificación corresponde solamente al grano fino (Ver Discusión de Resultados, página 20).

Las casillas vacías representan pruebas que no se pudieron concluir debido a que el tamaño de partícula era muy grande para la espita utilizada.

2. Penetración total (eficiencia total fina) (P_T)

Tabla 9. Penetración total (eficiencia total fina)

Penetración total (eficiencia total fina) (%)				
Grano	Operación	Espita	P_T promedio	\pm
Grueso (diámetro mayor a 600 μm)	Clarificación	Sin Espita	0.1199	0.00001
		Espita 0.6350 cm (1/4")	-	-
		Espita 0.3175 cm (1/8")	-	-
Mediano (diámetro entre 600 y 250 μm)	Clarificación	Sin Espita	0.1466	0.00001
		Espita 0.6350 cm (1/4")	0.1230	0.00001
		Espita 0.3175 cm (1/8")	-	-
Fino-Grueso* (diámetro menor a 250 μm)	Clasificación	Sin Espita	16.8275	0.00002
		Espita 0.6350 cm (1/4")	-	-
		Espita 0.3175 cm (1/8")	-	-

*La penetración total de la operación de clasificación corresponde solamente al grano fino (Ver Discusión de Resultados, página 20).

Las casillas vacías representan pruebas que no se pudieron concluir debido a que el tamaño de partícula era muy grande para la espita utilizada.

VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como primera fase de este trabajo se efectuaron pruebas de diagnóstico al hidrociclón y al equipo instalado con este. Dichas pruebas consistieron en hacer correr agua a través del equipo para probar el funcionamiento de la bomba, verificar que no hubiera fugas en todo el sistema y medir el caudal con el que se podría trabajar. En estas primeras pruebas se observó que la bomba instalada en el sistema no tenía la potencia suficiente para hacer funcionar el hidrociclón, por lo que se procedió a dimensionar la bomba adecuada para el sistema y seleccionar de qué tipo debe ser. Se determinó que se requiere de una bomba de 1492 W (2 hp), también, por requerirse para bombear mezclas espesas o lodos, la misma debe ser preferiblemente del tipo lobular. Como se puede observar en los Cálculos de Muestra, en el Apéndice de este mismo trabajo, el dimensionamiento de la bomba se calculó con la mayor exactitud posible, tomando en cuenta todos los aspectos del sistema que pueden influir en el rendimiento de la misma; de esta forma se calculó que la potencia de la bomba requerida por el sistema es de 1371.5831 W ($\pm 0.1.7144$), que equivale a 1.8386 hp (± 0.0023), y en vista de que no es viable adquirir una bomba con esa potencia exactamente y por el uso que se le va a dar se concluyó que la bomba requerida por el sistema es una bomba lobular de 1492 W (2 hp).

Se cotizaron bombas (Ver Tabla 19, Apéndice, página 42) y se pudo observar que para la misma potencia, 1492 W (2hp), las bombas lobulares tienen un precio más de 10 veces mayor que las centrífugas. Considerando lo anterior se recomendaría adquirir una bomba centrífuga y trabajar con mezclas en condiciones similares a las utilizadas en este experimento. Por otra parte, si el presupuesto lo permite, lo adecuado es adquirir una bomba lobular y evaluar la capacidad del hidrociclón con mezclas más concentradas.

Durante las pruebas iniciales, consultando el Manual de la Plataforma de Pruebas del Hidrociclón Mozley, se observó también que se carecía de espitas para operar con el hidrociclón, por lo cual se decidió diseñar y fabricar algunas. Las espitas son piezas que permiten variar el diámetro de salida del subflujo del hidrociclón. Poder variar el diámetro de salida del subflujo es importante ya que el diámetro de salida óptimo no puede ser determinado con precisión y su ajuste es vital para operar con la mayor eficiencia posible el hidrociclón. El diámetro de salida del subflujo afecta directamente la concentración del subflujo y el tamaño de corte (Svarovsky, 1984: 72). Se determinó que el diámetro de salida del hidrociclón sin espita es de 2 cm (± 0.001). Se decidió fabricar dos espitas, una con un diámetro de salida de 0.6350 cm ($1/4''$) y otra con un diámetro de salida de 0.3175 cm ($1/8''$). Se eligieron estos diámetros de salida para poder hacer pruebas con una variación notable en el diámetro de salida, se descartó utilizar un diámetro de salida más pequeño por lo difícil de elaborar las piezas. Durante los experimentos se observó que la espita de 0.6350 cm ($1/4''$) de diámetro de salida es recomendable para trabajar con partículas con un diámetro de entre 100 μm y 600 μm , se observó también que la espita de 0.3175 cm ($1/8''$) de diámetro de salida es recomendable para trabajar con partículas con un diámetro menor a 100 μm , estas observaciones fueron hechas al

trabajar con mezclas con concentraciones muy bajas, menores a 5% (P/V), por lo que se desconoce si son válidas para concentraciones mayores.

Los experimentos realizados con los granos de arroz molido son de dos tipos: operaciones de clarificación y operaciones de clasificación. Las operaciones de clarificación consisten en, como su nombre lo dice, clarificar, o reducir la concentración, de la parte líquida de una mezcla, aunque pueden ser requeridas para lo opuesto, hacer más espeso un lodo (Svarovsky, 1984: 1). Para las operaciones de clarificación se utilizó el grano grueso (con diámetro de partícula mayor a 600 μm) y el grano mediano (con diámetro de partícula entre 250 y 600 μm), se prepararon mezclas al 2.5% (P/V) de concentración con cada uno de los tamaños de grano y se hicieron pasar por el hidrociclón a modo de reducir la concentración de la mezcla en el sobreflujo y aumentarla en el subflujo, se prepararon 40 litros de cada mezcla y se obtuvo 20 litros de sobreflujo y 20 litros de subflujo en cada operación. Para estas operaciones de clarificación se determinó la eficiencia total basada en la recuperación de sólidos (E_T) y la penetración total (eficiencia total fina) (P_T), la E_T indica la eficiencia del hidrociclón para hacer más espeso el subflujo mientras que la P_T indica el porcentaje de partículas que salen con el sobreflujo.

Para la operación de clarificación de grano grueso, operando sin espita se obtuvo una E_T de 99.8801 % (± 0.0118) y una P_T de 0.1199 % (± 0.00001). Con el grano grueso no se logró operar con la espita de 0.6350 cm (1/4") ni con la de 0.3175 cm (1/8") debido a que se taponaban y se dejaba de obtener subflujo. Para la operación de clarificación de grano mediano, operando sin espita se obtuvo una E_T de 99.8534 % (± 0.0096) y una P_T de 0.1466 % (± 0.00001). Para la operación de clarificación de grano mediano, operando con la espita de 0.6350 cm (1/4"), la E_T fue de 99.8770 % (± 0.0115) y la P_T fue de 0.1230 % (± 0.00001). Con el grano mediano no se logró operar con la espita de 0.3175 cm (1/8") debido a que se taponaba y se dejaba de obtener subflujo. En las operaciones de clarificación llevadas a cabo se tuvo una muy alta E_T , indicando que, para ambos tamaños de grano, grueso y mediano, con o sin espita, más del 99% de dichos granos salían por el subflujo y recirculaban por el sistema haciendo más concentrada la mezcla, esto se debe a que se trabajó mezclas con concentraciones muy bajas, de 2.5 % P/V, lo que permitió al hidrociclón concentrar bastante los sólidos, llegando casi al 5% P/V, el doble de la concentración inicial. Los hidrociclones permiten concentrar mezclas sólido-líquido hasta alrededor de un 50% P/V (Svarovsky, 1984: 12), lo que deja ver que en las operaciones llevadas a cabo se tuvo un amplio margen para concentrar los sólidos. Lamentablemente, debido a no estar trabajando con una bomba adecuada para las condiciones de las mezclas, se decidió no extraer más de 20 litros de sobreflujo en cada operación, lo que impidió evaluar cuánto más líquido se podía clarificar, o bien, cuánto más se podía concentrar la mezcla.

Las operaciones de clasificación consisten en, como su nombre lo dice, clasificar, o separar distintos tipos o tamaños de sólidos (Svarovsky, 1984: 1). Para las operaciones de clasificación se utilizó el grano fino (con diámetro de partícula menor a 250 μm) mezclado junto con el grano grueso (con diámetro de partícula mayor a 600 μm) y se trató de separarlos usando el hidrociclón. Debido al poco grano fino con el que se contaba, para las operaciones de clasificación se preparó una mezcla que tenía 1.8750 % (P/V) (± 0.0234) de grano fino y 2.5% (P/V) (± 0.0313) de

grano grueso, y otra mezcla que tenía 1.8318 % (P/V) (± 0.0229) de grano fino y 2.5% (P/V) (± 0.0313) de grano grueso. Estas mezclas se hicieron pasar por el hidrociclón buscando separar el grano fino del grano grueso, se prepararon 40 litros de cada mezcla y se obtuvo 20 litros de sobreflujo y 20 litros de subflujo en cada operación. Para estas operaciones de clasificación se determinó la eficiencia total basada en la recuperación de sólidos (E_T) y la penetración total (eficiencia total fina) (P_T), la E_T indica la eficiencia del hidrociclón para hacer más espeso el subflujo mientras que la P_T indica el porcentaje de partículas que salen con el sobreflujo, en el caso de operaciones de clasificación, la P_T se puede interpretar como el porcentaje de partículas que se logró separar de la mezcla.

Para la operación de clasificación de grano fino y grueso se hicieron los cálculos de E_T y de P_T tomando en cuenta solamente la concentración de grano fino, tanto la concentración inicial, como la concentración final en el sobreflujo y en el subflujo, de esta manera el valor de E_T indica el porcentaje de grano fino que se concentró en la mezcla y el valor de P_T indica el porcentaje de grano fino se logró separar de la mezcla. Para la operación de clasificación, operando sin espita se obtuvo una E_T de 83.1725 % (± 0.0001) y una P_T de 16.8275 % (± 0.00002). Para las operaciones de clasificación no se logró operar con la espita de 0.6350 cm (1/4") ni con la de 0.3175 cm (1/8") debido a que se taponaban y se dejaba de obtener subflujo. En las operaciones de clasificación llevadas a cabo se obtuvo una baja P_T , indicando que solamente se logró separar alrededor del 16% del grano fino de la mezcla, esto puede deberse a que el tamaño de corte del hidrociclón probablemente no se encuentre en medio de los dos rangos de tamaño de las partículas clasificadas (partículas mayores a 600 μm y partículas menores a 250 μm), sino que dentro del rango del tamaño de partícula del grano fino, lo que explicaría que en el subflujo se retuviera alrededor del 83% del grano fino más casi el 100% del grano grueso. Lamentablemente, debido a no estar trabajando con una bomba adecuada para las condiciones de las mezclas, se decidió no extraer más de 20 litros de sobreflujo en cada operación, lo que impidió evaluar cuánto más del grano fino se pudo haber separado de la mezcla.

El principal problema que se presentó durante la realización de este trabajo fue que para operar el hidrociclón solamente se contaba con una bomba centrífuga, la cual no es adecuada para manejar lodos y que limitó el tipo de sólidos que se podía utilizar así como la concentración de las mezclas. Otro problema con el que cuenta el equipo es que el volumen de mezcla que se alimenta al hidrociclón es pequeño en relación al tamaño del hidrociclón, lo anterior hace que las operaciones duren poco tiempo y se dificulte la evaluación del rendimiento del hidrociclón en función del tiempo; el pequeño volumen alimentado permite también que exista riesgo de cavitación de la bomba debido a que una considerable parte del volumen de mezcla con el que se opera está circulando dentro del hidrociclón durante toda la operación, dejando poca mezcla en el depósito, lo que permite el ingreso de aire a la bomba.

Durante la realización de este trabajo se observó que, por su forma de operar, el hidrociclón sería bastante aprovechable en procesos que requieran separación de sólidos y líquidos pero con alimentación continua, un ejemplo sería la extracción de agua de pozos, en este procesos muchas veces existe arrastre de arena y otros sólidos, un hidrociclón podría ser muy eficiente para retirar estos sólidos del agua si se colocara entre la bomba y el destino

final del agua. La alimentación continua también permitiría una evaluación más concluyente acerca del rendimiento del hidrociclón ya que se contaría con mayor tiempo de operación y corrientes de salida con un caudal constante.

IX. CONCLUSIONES

1. La bomba requerida por el sistema es una bomba lobular de 1492 W (2 hp).
2. La espita de 0.6350 cm (1/4'') de diámetro de salida es recomendable para partículas con un diámetro de entre 100 μm y 600 μm .
3. La espita de 0.3175 cm (1/8'') de diámetro de salida es recomendable para partículas con un diámetro menor a 100 μm .
4. Para la operación de clarificación de grano grueso, operando sin espita se obtuvo una E_T de 99.8801 % (± 0.0118) y una P_T de 0.1199 % (± 0.00001).
5. Para la operación de clarificación de grano mediano, operando sin espita se obtuvo una E_T de 99.8534 % (± 0.0096) y una P_T de 0.1466 % (± 0.00001). Para la operación de clarificación de grano mediano, operando con la espita de 0.6350 cm (1/4''), la E_T fue de 99.8770 % (± 0.0115) y la P_T fue de 0.1230 % (± 0.00001).
6. Para la operación de clasificación, operando sin espita se obtuvo una E_T de 83.1725 % (± 0.0001) y una P_T de 16.8275 % (± 0.00002).

X. RECOMENDACIONES

1. Debido al alto costo de una bomba lobular y al uso que se le daría se recomienda adquirir una bomba centrífuga y trabajar con mezclas en condiciones similares a las usadas en este trabajo.
2. Se recomienda utilizar el hidrociclón en un sistema de alimentación continua que permita evaluar más concluyentemente su rendimiento.

XI. MANUAL DE OPERACIÓN

A. Objetivos

1. Evaluar el rendimiento del hidrociclón determinando la eficiencia total basada en la recuperación de sólidos (E_T) y la penetración total (eficiencia total fina) (P_T).

B. Material y equipo

1. Arroz molido y clasificado en distintos tamaños.
2. Cubetas de 40 litros
3. Cubetas de 10 litros
4. Manta o filtro lo suficientemente grande para filtrar 20 litros.

C. Procedimientos de operación

Los siguientes procedimientos son válidos tanto para operaciones con un solo rango de tamaño de partícula (clarificación de líquidos, espesamiento de lodos, lavado de sólidos, etc) como para operaciones con dos o más rangos de tamaño de partícula (separación y clasificación de sólidos).

1. Selección y colocación de espita

- Seleccionar y colocar la espita con la que se trabajará, el diámetro de salida que se tenga en el subflujo afectará el rendimiento y la duración de la operación. La siguiente tabla sirve como guía para la selección de la espita a utilizar:

Tabla 10. Selección de espita

Selección de espita	
Diámetro de partícula (μm)	Espita a utilizar
Menor que 100	Espita de 0.3175 cm (1/8")
De 100 a 600	Espita de 0.6350 cm (1/4")
Mayor que 600	Sin espita

La Tabla 10 es solamente una guía para la selección de la espita a utilizar según el diámetro de las partículas en la mezcla y fue obtenida según las condiciones de experimentación de la presente

investigación, por lo tanto puede no ser válida para mezclas con concentraciones mucho mayores a las de las mezclas trabajadas en esta investigación.

2. Carga de la mezcla

- Llenar el depósito del sistema con 40 litros de la mezcla a trabajar, dicha mezcla debe ser preparada fuera del depósito del sistema y ser posteriormente vertida en éste.

3. Inicio de operación

- Abrir completamente las llaves de globo 1 y 2 (Ver Figura 12, Apéndice, página 31).
- Posicionar la manguera de salida del sobreflujo de manera que éste sea vertido de regreso al depósito.
- Encender la bomba.

4. Recolección de sobreflujo

- Dejar que la mezcla recorra el sistema por al menos 1 minuto (para permitir que la misma esté recorriendo todo el hidrociclón).
- Hacer fluir la corriente de la manguera de sobreflujo hacia una cubeta de 40 litros.
- Con la mezcla recorriendo el sistema, recolectar el sobreflujo, para esto se debe dejar fluir la corriente de la manguera de sobreflujo hacia un recipiente adicional.
- Cerrar gradualmente la llave 1 a lo largo de la operación. Conforme se recolecta el sobreflujo, el volumen de mezcla recorriendo el sistema disminuirá y el sobreflujo perderá caudal, por lo tanto, para mantener el caudal del sobreflujo lo más constante posible es necesario cerrar gradualmente la llave 1 a lo largo de la operación, esto permitirá seguir recolectando el sobreflujo de manera regular. En caso de trabajar sin espita es muy probable que no se tenga sobreflujo al iniciar la operación, por lo tanto, como se describió anteriormente, es necesario cerrar gradualmente la llave 1 a lo largo de la operación para poder recolectar el sobreflujo de manera regular.
- Detener la recolección de sobreflujo antes de que haya tan poca mezcla en el recipiente que permita que haya cavitación en la bomba, se recomienda entonces detener la recolección de sobreflujo al haber extraído alrededor de 25 litros de sobreflujo. Para detener la recolección de sobreflujo se debe dejar fluir éste hacia el depósito del sistema y apagar la bomba.

5. Limpieza del sistema

- Se debe limpiar el sistema después de cada operación, para esto se debe vaciar lo más que sea posible el depósito del sistema, lo anterior se puede hacer con cubetas y esponjas u otro material absorbente.
- En caso de no estar siendo la espita utilizada, se debe colocar la espita de 1/8".
- Se debe llenar con agua el depósito, abrir completamente las 2 llaves de globo, colocar la manguera de sobreflujo de manera que éste se vierta de regreso al depósito y sostener una cubeta en la salida del subflujo.
- Encender la bomba por alrededor de 2 minutos, esto permitirá que el agua haga circular las partículas restantes de la operación realizada y que vayan depositándose en la cubeta a la salida del subflujo.
- Según el tamaño de partícula que se haya tenido es posible que la espita se haya obstruido, esto, de alguna manera, hará más fácil la limpieza, pues la mayoría de partículas estarán atrapadas dentro del hidrociclón, por lo que, al termino de los 2 minutos sólo se deberá retirar la espita y todas esas partículas caerán dentro de la cubeta a la salida del subflujo, en este último paso se debe tomar en cuenta que al retirar la espita el contenido dentro del hidrociclón caerá bruscamente hacia la cubeta, por lo que debe ser sostenida firmemente para evitar que caiga de nuevo al depósito junto con los sólidos que se había retirado.
- Todo este proceso debe repetirse una o dos veces más de modo que no queden partículas que interfieran con la próxima operación a realizarse en el sistema.

D. Procedimientos de seguridad

Para evitar accidentes y daños al equipo se deben tomar en cuenta los siguientes procedimientos de seguridad:

- Verificar que las dos llaves de globo estén completamente abiertas antes de arrancar la bomba.
- Cebear la bomba antes de arrancarla, para esto es suficiente que el depósito cuente con líquido o la mezcla a trabajar antes de arrancar la bomba.
- No encender la bomba con el depósito vacío.
- Evitar la formación de vórtices en el depósito para que no exista cavitación en la bomba.
- Verificar que no hayan caído al fondo del depósito piezas que puedan dañar la bomba.
- Tapar el fondo del depósito con un trapo o esponja al terminar de usar el aparato.
- Limpiar el equipo después de usarlo.

XII. BIBLIOGRAFÍA

McCabe, Warren; J. Smith y P. Harriot. 2003. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. 5ª edición. México D.F., Mc Graw-Hill. 1199 páginas.

Svarovsky, Ladislav. 1984. *Hydrocyclones*. Pennsylvania, Technomic Publishing Co., Inc. 198 páginas

Treybal, Robert. 2004. *Operaciones de transferencia de masa*. 8ª edición. García, Amelia. México D.F., McGraw-Hill. 864 páginas.

Lama, Fernando. 2004. *Manual de Instrucciones de Hidrociclón Lama*. 2ª edición. Sevilla. 3 páginas.

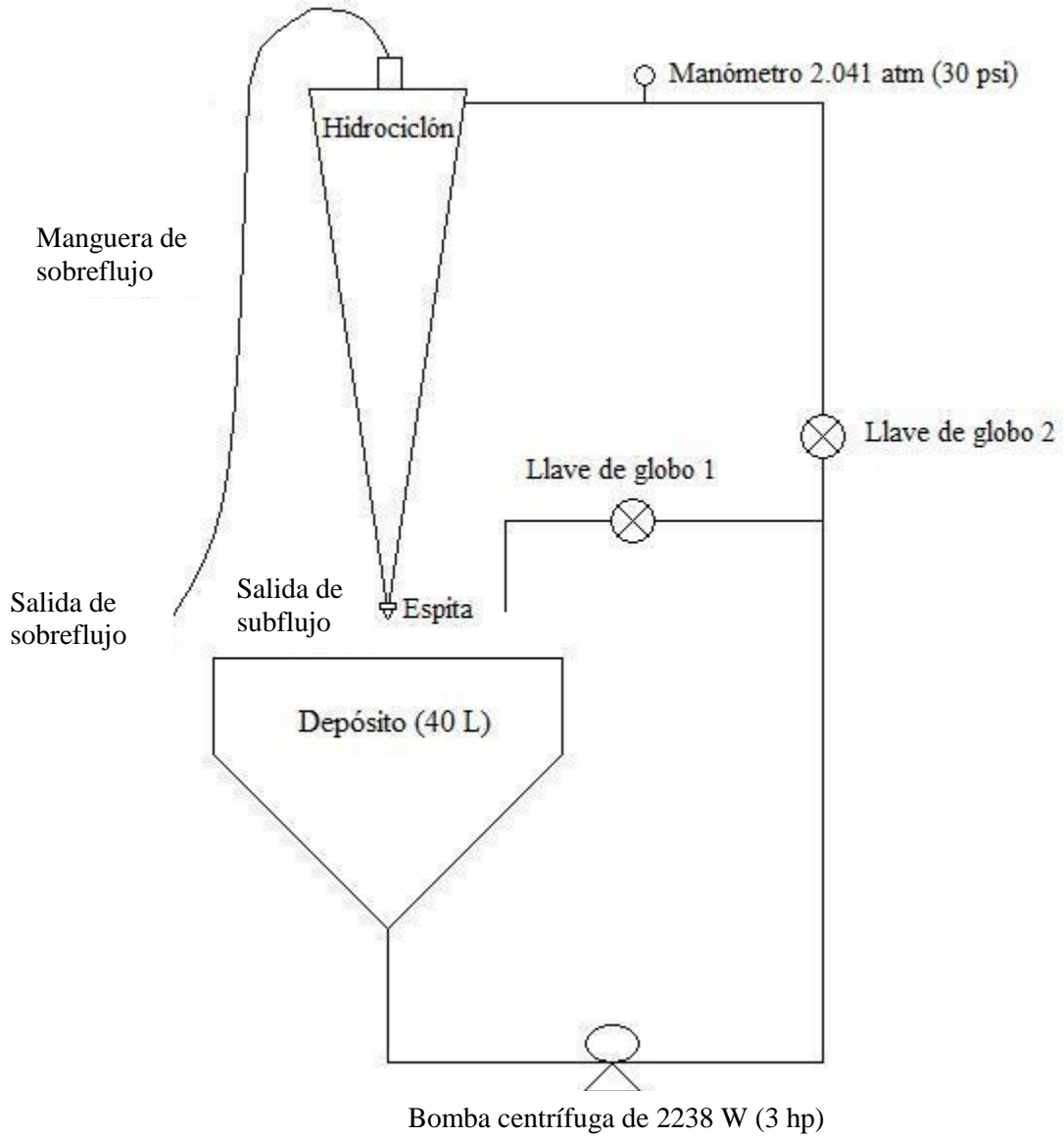
Manual de la Plataforma de Pruebas de Hidrociclones Mozley de 1'' y 2''. Falmouth, Century Litho. 4 páginas.

Manual de Hidrociclones KS. 4 páginas.

XIII. APÉNDICE

A. Diagrama del equipo

Figura 12. Diagrama del equipo



B. Fotografía del equipo

Figura 13. Fotografía del equipo



C. Datos originales

1. Peso de arroz y volumen de agua utilizados para cada corrida

Tabla 11. Peso de arroz y volumen de agua para corridas sin espita

		Sin Espita							
		Corrida 1				Corrida 2			
Operación	Grano	Peso (Kg)	±	Vol. (L)	±	Peso (Kg)	±	Vol. (L)	±
Clarificación	Grueso	1.0000	0.0001	40	0.5	1.0000	0.0001	40	0.5
Clarificación	Mediano	1.0000	0.0001	40	0.5	1.0000	0.0001	40	0.5
Clasificación	Grueso-Fino*	0.7500	0.0001	40	0.5	0.7327	0.0001	40	0.5

*El peso de la operación de clasificación corresponde solamente al grano fino, para esta operación también se utilizó 1.0000 Kg ± 0.0001 de grano grueso (Ver Discusión de Resultados, página 20).

Tabla 12. Peso de arroz y volumen de agua para corridas con espita de 0.6350 cm (1/4")

		Espita de 0.6350 cm (1/4")							
		Corrida 1				Corrida 2			
Operación	Grano	Peso (Kg)	±	Vol. (L)	±	Peso (Kg)	±	Vol. (L)	±
Clarificación	Grueso	-	-	-	-	-	-	-	-
Clarificación	Mediano	1.0000	0.0001	40	0.5	1.0000	0.0001	40	0.5
Clasificación	Grueso-Fino*	-	-	-	-	-	-	-	-

2. Masa recuperada en cada operación

Tabla 13. Masa recuperada en 20 litros de sobreflujo de cada operación

		Masa recuperada en 20 litros de sobreflujo (gramos)							
		Sin Espita				Espita de 0.6350 cm (1/4")			
Operación	Grano	Corrida 1	±	Corrida 2	±	Corrida 1	±	Corrida 2	±
Clarificación	Grueso	1.2249	0.0001	1.1739	0.0001	-	-	-	-
Clarificación	Mediano	1.4944	0.0001	1.4382	0.0001	1.2638	0.0001	1.1965	0.0001
Clasificación	Grueso-Fino*	121.6427	0.0001	127.7541	0.0001	-	-	-	-

*El peso de la operación de clasificación corresponde solamente al grano fino (Ver Discusión de Resultados, página 20).

D. Datos calculados

1. Concentración de mezcla durante las operaciones

Tabla 14. Concentración inicial

		Concentración Inicial (% P/V)							
		Sin Espita				Espita 1/4"			
Operación	Grano	Corrida 1	±	Corrida 2	±	Corrida 1	±	Corrida 2	±
Clarificación	Grueso	2.5000	0.0313	2.5000	0.0313	-	-	-	-
Clarificación	Mediano	2.5000	0.0313	2.5000	0.0313	2.5000	0.0313	2.5000	0.0313
Clasificación	Grueso-Fino*	1.8750	0.0234	1.8318	0.0229	-	-	-	-

*La concentración de la operación de clasificación corresponde solamente al grano fino (Ver Discusión de Resultados, página 20).

Tabla 15. Concentración del sobreflujo

		Concentración Sobreflujo (% P/V)							
		Sin Espita				Espita de 0.6350 cm (1/4")			
Operación	Grano	Corrida 1	±	Corrida 2	±	Corrida 1	±	Corrida 2	±
Clarificación	Grueso	0.006125	0.000153	0.005870	0.000147	-	-	-	-
Clarificación	Mediano	0.007472	0.000187	0.007191	0.000180	0.006319	0.000158	0.005983	0.000150
Clasificación	Grueso-Fino*	0.608214	0.015205	0.638771	0.015969	-	-	-	-

*La concentración de la operación de clasificación corresponde solamente al grano fino (Ver Discusión de Resultados, página 20).

Tabla 16. Concentración del subflujo

		Concentración Subflujo (% P/V)							
		Sin Espita				Espita de 0.6350 cm (1/4")			
Operación	Grano	Corrida 1	±	Corrida 2	±	Corrida 1	±	Corrida 2	±
Clarificación	Grueso	4.993876	0.124849	4.994131	0.124855	-	-	-	-
Clarificación	Mediano	4.992528	0.124815	4.992809	0.124822	4.993681	0.124844	4.994018	0.124852
Clasificación	Grueso-Fino*	3.141787	0.078546	3.024730	0.075619	-	-	-	-

*La concentración de la operación de clasificación corresponde solamente al grano fino (Ver Discusión de Resultados, página 20).

2. Eficiencia total basada en la recuperación de sólidos

Tabla 17. Eficiencia total basada en la recuperación de sólidos

Eficiencia total basada en la recuperación de sólidos (%)							
Grano	Operación	Espita	Corrida	E _T	±	E _T promedio	±
Grueso	Clarificación	Sin Espita	Corrida 1	99.8775	0.0082	99.8801	0.0118
			Corrida 2	99.8826	0.0085		
		Espita de 0.6350 cm (1/4")	Corrida 1	-	-	-	-
			Corrida 2	-	-		
		Espita de 0.3175 cm (1/8")	Corrida 1	-	-	-	-
			Corrida 2	-	-		
Mediano	Clarificación	Sin Espita	Corrida 1	99.8506	0.0067	99.8534	0.0096
			Corrida 2	99.8562	0.0069		
		Espita de 0.6350 cm (1/4")	Corrida 1	99.8736	0.0079	99.8770	0.0115
			Corrida 2	99.8804	0.0083		
		Espita de 0.3175 cm (1/8")	Corrida 1	-	-	-	-
			Corrida 2	-	-		
Fino-Grueso*	Clasificación	Sin Espita	Corrida 1	83.7810	0.0001	83.1725	0.0001
			Corrida 2	82.5639	0.0001		
		Espita de 0.6350 cm (1/4")	Corrida 1	-	-	-	-
			Corrida 2	-	-		
		Espita de 0.3175 cm (1/8")	Corrida 1	-	-	-	-
			Corrida 2	-	-		

*La eficiencia total de la operación de clasificación corresponde solamente al grano fino (Ver Discusión de Resultados, página 20).

3. Penetración total (eficiencia total fina)

Tabla 18. Penetración total (eficiencia total fina)

Penetración total (eficiencia total fina) (%)							
Grano	Operación	Espita	Corrida	E	±	E promedio	±
Gruoso	Clarificación	Sin Espita	Corrida 1	0.1225	0.00001	0.1199	0.00001
			Corrida 2	0.1174	0.00001		
		Espita de 0.6350 cm (1/4")	Corrida 1	-	-	-	-
			Corrida 2	-	-		
		Espita de 0.3175 cm (1/8")	Corrida 1	-	-	-	-
			Corrida 2	-	-		
Mediano	Clarificación	Sin Espita	Corrida 1	0.1494	0.00001	0.1466	0.00001
			Corrida 2	0.1438	0.00001		
		Espita de 0.6350 cm (1/4")	Corrida 1	0.1264	0.00001	0.1230	0.00001
			Corrida 2	0.1197	0.00001		
		Espita de 0.3175 cm (1/8")	Corrida 1	-	-	-	-
			Corrida 2	-	-		
Fino-Gruoso*	Clasificación	Sin Espita	Corrida 1	16.2190	0.00001	16.8275	0.00002
			Corrida 2	17.4361	0.00001		
		Espita de 0.6350 cm (1/4")	Corrida 1	-	-	-	-
			Corrida 2	-	-		
		Espita de 0.3175 cm (1/8")	Corrida 1	-	-	-	-
			Corrida 2	-	-		

*La penetración total de la operación de clasificación corresponde solamente al grano fino (Ver Discusión de Resultados, página 20).

E. Cálculos de Muestra

1. Dimensionamiento de la bomba. Para el dimensionamiento de la bomba, primero se calculó el valor de W_p de la siguiente ecuación

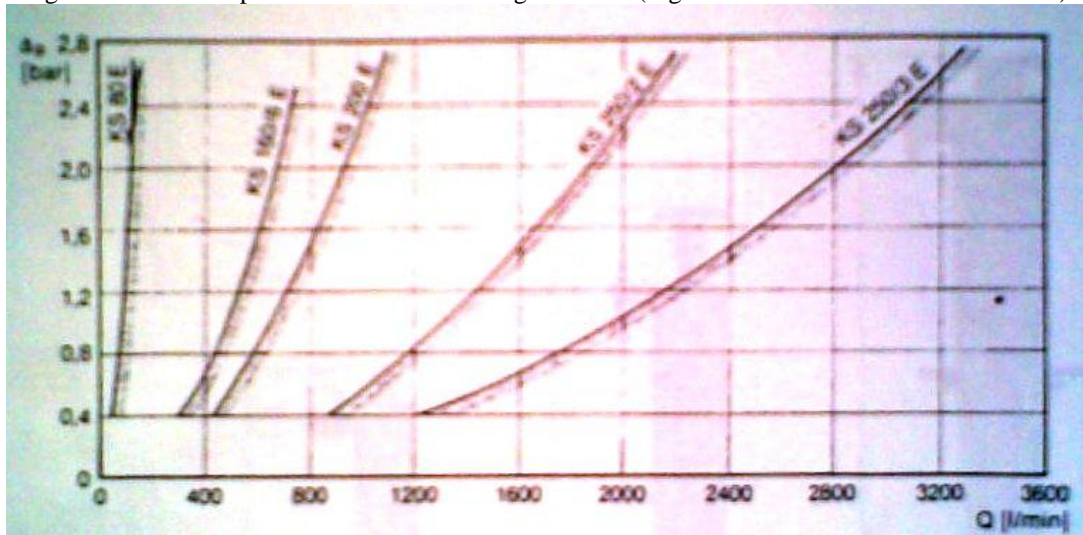
$$\eta W_p = \frac{P_b - P_a}{\rho} + g(Z_b - Z_a) + \frac{V_b^2 - V_a^2}{2} + h_f \quad (\text{Ecuación 7})$$

Para la cual se tomó como punto a la entrada de la bomba y como punto b la salida de la misma, lo cual redujo la Ecuación 7 a

$$\eta W_p = \frac{P_b - P_a}{\rho} + h_f \quad (\text{Ecuación 8})$$

Para el punto b se tomó en cuenta la caída de presión del hidrociclón, la cual se obtuvo según la primera curva de la siguiente figura (curva correspondiente al modelo de hidrociclón usado)

Figura 14. Caída de presión del hidrociclón según caudal (Figura 1. Manual de Hidrociclones KS)



Según la Figura 14, tomando como caudal máximo 160 L/min ($0.002666 \text{ m}^3/\text{s}$) se tiene una caída de presión de 2.5 bar (250000 Pa) en el hidrociclón, presión que tiene que vencer la bomba en el punto b . La presión atmosférica se canceló por estar presente en ambos lados de la bomba, la presión ejercida por el fluido se canceló también en ambos lados, sin embargo, en el punto b se sumó la presión ejercida por la columna de fluido del lado del punto b que sobrepasa la altura del fluido en el lado del punto a . La presión ejercida por dicha columna es

$$P = \rho g Z = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 1.3 \text{ m } (\pm 0.005) = 12753 \text{ Pa } (\pm 49.0499)$$

Las pérdidas por fricción se calcularon tomando en cuenta el factor de fricción de la tubería utilizada, $f = 0.0085$, y los coeficientes de pérdida por fricción de los accesorios en el sistema: dos codos de 90° ($K_f = 0.75$ cada uno), una "T" en línea recta ($K_f = 0.4$) y una válvula de globo ($K_f = 6.0$). La fricción total es entonces

$$h_f = \left(4f \frac{L}{D} + K_c + K_e + K_f\right) \frac{V^2}{2} = \left(4(0.0085) \frac{4 \text{ m } (\pm 0.005)}{0.0266446 \text{ m}} + 7.9\right) \frac{\left(4.78256 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} = 148.7220 \frac{\text{J}}{\text{s}} (\pm 0.1859)$$

Por lo anterior, y considerando una eficiencia de bomba de 0.8, W_p se calculó de la Ecuación 8 de la siguiente manera

$$0.8W_p = \frac{262753 \text{ Pa } (\pm 49.0499)}{1000 \text{ Kg/m}^3} + 148.7220 \text{ J/s } (\pm 0.1859)$$

De donde se obtiene $W_p = 514.3438 \text{ J/s } (\pm 0.6429)$

La potencia de la bomba calculó de la siguiente ecuación

$$P = \dot{m}W_p \quad (\text{Ecuación 9})$$

Considerando el caudal de $0.002666 \text{ m}^3/\text{s}$ y una densidad de 1000 kg/m^3 , se tiene un flujo másico (\dot{m}) de 2.6666 kg/s , por lo que la potencia de la bomba se calcularía así

$$P = (2.6666 \text{ kg/s})(514.3438 \text{ J/s } (\pm 0.6429))$$

De donde se obtiene $P = 1371.5831 \text{ W } (\pm 0.1.7144)$ ($1.8386 \text{ hp } (\pm 0.0023)$)

Por lo anterior, y considerando el tipo de mezclas a trabajar, se recomienda entonces una bomba lobular de 2 hp.

2. **Cálculo de concentración inicial.** La concentración inicial de la mezcla para cada corrida se calculó como en el siguiente ejemplo (corrida 1, operación de clarificación de grano grueso, Tabla 14 de este mismo capítulo)

$$\% (P/V) = \frac{1.0000 \text{ Kg } (\pm 0.0001)}{40 \text{ L } (\pm 0.5)} * 100$$

$$\% (P/V) = 2.5000 \% \pm 0.0313$$

3. Cálculo de concentración de sobreflujo. La concentración del sobreflujo para cada corrida se calculó como en el siguiente ejemplo (corrida 1, operación de clarificación de grano grueso, Tabla 15 de este mismo capítulo)

$$\% (P/V) = \frac{1.2249 \text{ g } (\pm 0.0001) * \left(\frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}} \right)}{20 \text{ L } (\pm 0.5)} * 100$$

$$\% (P/V) = 0.006125 \% \pm 0.000153$$

4. Cálculo de concentración de subflujo. La concentración del subflujo para cada corrida se calculó como en el siguiente ejemplo (corrida 1, operación de clarificación de grano grueso, Tabla 16 de este mismo capítulo)

$$\% (P/V) = \frac{1 \text{ Kg} - \left[1.2249 \text{ g } (\pm 0.0001) * \left(\frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}} \right) \right]}{20 \text{ L } (\pm 0.5)} * 100$$

$$\% (P/V) = 4.993876 \% \pm 0.124849$$

5. Cálculo de la eficiencia total basada en la recuperación de sólidos. La eficiencia total para cada corrida se calculó como en el siguiente ejemplo (corrida 1, operación de clarificación de grano grueso sin espita, Tabla 17 de este mismo capítulo)

$$E_T = \frac{1 \text{ Kg} - \left[1.2249 \text{ g } (\pm 0.0001) * \left(\frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}} \right) \right]}{1 \text{ Kg } (\pm 0.0001)} * 100$$

$$E_T = 99.8775 \% \pm 0.0082$$

6. Cálculo de la penetración total (eficiencia total fina). La penetración total para cada corrida se calculó como en el siguiente ejemplo (corrida 1, operación de clarificación de grano grueso sin espita, Tabla 18 de este mismo capítulo)

$$P_T = \frac{1.2249 \text{ g } (\pm 0.0001) * \left(\frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}} \right)}{1 \text{ Kg } (\pm 0.0001)} * 100$$

$$P_T = 0.1225 \% \pm 0.00001$$

F. Cotización de bombas

Cotización de bombas de 1492 W (2 hp), centrífugas y lobulares.

Tabla 19. Cotización de Bombas

Tipo de bomba	Distribuidor	Precio (Q)
Centrífuga (toda en hierro)	Hidrotecnia	5,495.00
Centrífuga (partes plásticas)	Hidrotecnia	3,620.00
Centrífuga	Maquinaria Töpke	4,000.00
Lobular	Maquinaria Töpke	70,000.00
Lobular	Maquinsa	82,000.00

G. Costo total del equipo

Costo total del equipo instalado más el costo de una bomba adecuada aún no instalada.

Tabla 20. Costo total del equipo

Equipo	Costo
Hidrociclón KS 80E	Q 16,000.00
Plataforma de Hidrociclón	Q 8,000.00
Bomba Centrífuga de 1492 W (2 hp)	Q 4,000.00
Total 1	Q 28,000.00

Equipo	Costo
Hidrociclón KS 80E	Q 16,000.00
Plataforma de Hidrociclón	Q 8,000.00
Bomba Lobular de 1492 W (2 hp)	Q 70,000.00
Total 2	Q 94,000.00