

DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN HIDROCICLÓN PARA LA SEPARACIÓN DE ALMIDÓN DE SORGO A ESCALA PILOTO

Pablo Martín Palavecino, ICYTAC (UNC-CONICET), pmpalavecino@gmail.com

Gabriela Noel Barrera, ICYTAC (UNC-CONICET), FCEFYN-UNC
gbarrera@agro.unc.edu.ar

María Cecilia Penci, ICYTAC (UNC-CONICET), FCEFYN-UNC
cecilia.penci@unc.edu.ar

Pablo Daniel Ribotta, ICYTAC (UNC-CONICET), FCEFYN-UNC
pribotta@agro.unc.edu.ar

Resumen— El almidón es un polímero natural producido por muchas plantas para almacenar energía, por lo tanto, es renovable y biodegradable. Es utilizado ampliamente en la industria alimentaria y su fuente más habitual es el maíz. El sorgo presenta ventajas frente a este último ya que tolera mejor la sequía, se asocia a menores costos de semilla y producción y no requiere de condiciones muy fértiles para su cultivo. La separación del almidón de los granos normalmente se realiza por procedimientos que implican la molienda húmeda de los mismos, y luego se usan diversas etapas de separación. Con el objetivo de desarrollar un procedimiento de separación de almidón de sorgo a escala piloto, se diseñó y caracterizó un hidrociclón. El dimensionamiento del equipo se realizó a partir de ecuaciones empíricas basadas en numerosos estudios hidrodinámicos y luego se diseñó para su construcción mediante impresión 3D. Las variables de diseño dieron como resultado la elección de una geometría tipo Bradley y las siguientes dimensiones: diámetro interno de 80 mm, largo total de 548 mm y diámetro de 10 mm para la entrada. Se encontró una separación óptima alimentando el hidrociclón con suspensiones de 1% v/v de harina de sorgo (65,8% de almidón en base seca) en agua a 25 L/min con una caída de presión de 0,5 bar, obteniéndose un producto final de 89,6% de almidón en base seca. Los resultados indicaron que este método de diseño simple pudo predecir adecuadamente el comportamiento real del equipo. También es posible concluir que la impresión 3D es una alternativa económica y viable para la construcción de prototipos a escala piloto.

Palabras clave— *sorgo, almidón, hidrociclón.*

1. Introducción

El grano de cereal consta de tres grandes partes, cuya proporción varía, según la especie: pericarpio, germen y endospermo. En este último se encuentra contenido el almidón. Este es un polímero de glucosa producido por muchas plantas para almacenar energía, es renovable y biodegradable, y sus usos en la industria alimentaria son muy amplios y

diversos. Se utiliza en sopas y salsas, productos de panadería, productos lácteos, confitería, snacks, coberturas y productos cárnicos. El almidón afecta diferentes características de los productos alimenticios, como textura, viscosidad, formación de gel, adhesión, unión, retención de la humedad, formación de película y homogeneidad.

La fuente más habitual para la obtención de almidón es el maíz, aunque existe un cereal, el sorgo, que presenta ventajas frente a este último ya que tolera mejor la sequía, se asocia a menores costos de semilla y producción y no requiere de condiciones de alta fertilidad para su cultivo. Este es rico en almidón, ya que representa cerca de un 70% de la masa de su grano. Estas características lo hacen un cultivo óptimo para aplicaciones industriales, sin embargo, es subutilizado [1]. En Argentina, se destina mayormente al mercado interno, siendo la alimentación animal su principal destino. Las áreas de cultivo más importantes se encuentran en las provincias de Córdoba, Buenos Aires y Santa Fe.

El almidón de sorgo posee normalmente una proporción 3:1 de amilopectina/amilosa, el tamaño de los gránulos varía entre 5 y 34 μm presentando una distribución normal y su forma puede ser esferoidal o poliédrica.

Sí bien durante la Segunda Guerra Mundial se utilizó el de sorgo como materia prima de partida en la producción comercial de almidón y dextrosa, a la fecha, no se conocen operaciones comerciales de molienda húmeda de sorgo. Rooney y Serna-Saldívar [2] detallan un proceso comercial de molienda húmeda para sorgo, aunque con dificultades para separar correctamente la fibra y el germen.

La separación del almidón de los granos normalmente se realiza por procedimientos que implican molienda húmeda y diversas etapas de separación. Desde hace muchos años, la industria del almidón utiliza hidrociclones para purificar el almidón para separarlo de las impurezas mediante un sistema de lavado. Los hidrociclones presentan algunas ventajas: el bajo costo, la ausencia de partes móviles y el amplio rango de operación. Se pueden enumerar también ciertas desventajas, como la baja capacidad y la relativamente baja eficiencia [3]. Para superar esta última desventaja, a nivel industrial se utilizan baterías de al menos tres hidrociclones en serie y para mejorar la capacidad se elige una disposición de hidrociclones en paralelo.

Los hidrociclones consisten en una sección cilíndrica con un tubo central conectado a una sección cónica con un tubo de descarga (Figura 1). El conducto de entrada es tangencial al cilindro y está unido a la sección superior del mismo. El fluido que ingresa al hidrociclón causa remolinos dentro del dispositivo, generando así fuerzas centrífugas que envían las partículas más gruesas y pesadas hacia la pared y son arrastradas hacia el extremo inferior del cono. A su vez, esta salida restringe el flujo en espiral descendente y, por lo tanto, una columna central de líquido genera en espiral ascendente y sale a través del tubo superior (*vortex*). Este flujo ascendente contiene las partículas más finas y ligeras [4].

El rendimiento de separación mediante un hidrociclón está influenciado por su geometría, tamaño, variables operativas y propiedades físicas de los sólidos y del fluido. Los mecanismos de separación e hidrodinámica que actúan en los hidrociclones son muy complejos y difíciles de modelar teóricamente, siendo común la adopción de modelos empíricos basados en pruebas de laboratorio para estimar el rendimiento de los hidrociclones [5]. El modelo más utilizado para el cálculo del tamaño de corte de hidrociclones fue propuesto por Plitt [6] y a lo largo de los años se propusieron muchas revisiones y correcciones al modelo. Una de las modificaciones en esta ecuación fue

propuesta por Silva [5] e incluye variables que no fueron tenidas en cuenta en el trabajo original de Plitt:

$$d_{50} = \frac{50,5 D_c^{0,46} D_i^{0,6} D_o^{1,21} \mu^{0,5} e^{0,063\phi}}{D_u^{0,71} h^{0,38} Q^{0,45} (\rho_s - \rho_l)^{0,5}} \quad (1)$$

Donde, D_c (cm) es el diámetro interno de la sección cilíndrica del hidrociclón, D_i (cm) es el diámetro interno de la entrada, D_o (cm) es el diámetro interno de la salida superior (*overflow*), D_u (cm) es el diámetro interno de la salida inferior (*underflow*), h (cm) es la distancia entre la parte inferior del vortex y la salida inferior, Q (L/min) es el flujo volumetrico de la alimentación, ρ_s (g/cm³) es la densidad del sólido y ρ_l (g/cm³) es la densidad del líquido, μ es la viscosidad dinámica del fluido (cP), ϕ (%) es la fracción volumétrica de sólidos en la alimentación y d_{50} (μm) es el tamaño de corte, es decir, el diámetro de partícula que exhibe una eficacia de separación del 50%.

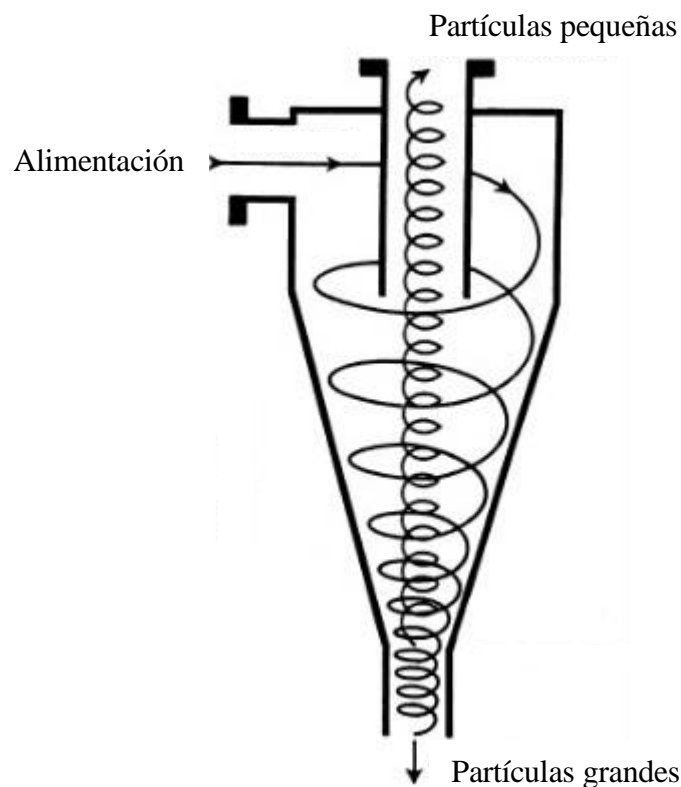


Figura 1. Esquema de un hidrociclón. Elaboración propia.

Es posible agrupar los hidrociclones en familias según sus características geométricas. Entre ellas se encuentran hidrociclones tipo Bradley [7], que exhiben diámetros de corte más precisos pero menores rendimientos. Este tipo de ciclones presentan relaciones geométricas constantes; por lo tanto son equipos fácilmente escalables.

El objetivo de la investigación fue desarrollar un procedimiento de separación de almidón de sorgo a escala piloto, para lo que se planteó diseñar, construir y caracterizar un hidrociclón.

2. Materiales y Métodos

2.1 Materiales

Se utilizó harina de sorgo blanco a partir del híbrido comercial Pannar-8706 W. Esta fue obtenida a escala industrial con un proceso de pelado parcial y luego molienda mediante un molino de martillos. Esta harina posee en base seca 1,2% de cenizas, 5,4% de lípidos, 7,9% proteínas y 85,5% de carbohidratos (65,8% de almidón).

2.2 Determinación del d_{50}

El tamaño de corte se determinó mediante la tamización del producto proveniente de la etapa anterior del proceso de separación y la medición del almidón total del retenido de cada tamiz. Para la tamización se utilizó una serie de tamices con mallas ASTM 400, 270, 100 y 50.

2.3 Diseño del ciclón

El dimensionamiento del equipo se realizó a partir de la Ecuación 1 teniendo en cuenta las relaciones geométricas de un ciclón tipo Bradley explicitadas en la Tabla 1. Donde, l es el largo del *vortex* y L es el largo total del hidrociclón.

Tabla 1. Relaciones geométricas de un ciclón tipo Bradley

Dimensiones del hidrociclón	D_i/D_c	D_o/D_c	D_w/D_c	l/D_c	L/D_c	Ángulo del cono
Bradley	0.13	0.20	0.07	0.33	6.85	9°

Para el diseño se utilizaron los siguientes valores de las propiedades de los componentes de la mezcla: viscosidad dinámica del agua a 25°C = 0,9 cP, su densidad = 1 g/cm³ y la densidad de la harina de sorgo = 1,6 g/cm³ de acuerdo con Singh y Eckhoff [8].

La fracción volumétrica de sólidos en la alimentación (ϕ) estuvo limitada por la etapa anterior del proceso de separación que consiste en la molienda de la harina mediante un molino coloidal. Además, a concentraciones medias y altas las suspensiones de almidón no se comportan como fluidos newtonianos, condición donde la Ecuación 1 dejaría de ser válida. Por ello la ϕ establecida como límite superior y la utilizada para el diseño fue de 5%.

Debido a que las pruebas fueron realizadas en lotes y debe lograrse que el hidrociclón opere en régimen estacionario, se limitaron los volúmenes de corriente de entrada a 25 L. Como consecuencia se eligió como variable de diseño un caudal de 25 L/min.

El sistema de ecuaciones para el dimensionamiento del hidrociclón fue resuelto mediante el software de cálculo Mathcad (versión 15, PTC).

2.4 Construcción del sistema y medición de parámetros

El diseño final para la impresión 3D del hidrociclón se realizó mediante el software de diseño y desarrollo de productos 3D CATIA (v5, Dassault Systemes). La impresión se realizó en ABS (por sus siglas en inglés, acrilonitrilo butadieno estireno) mediante una impresora ensamblada por Scope Ingeniería (Córdoba, Argentina).

La medición de las variables de proceso más importantes fue llevada a cabo mediante un sistema construido a partir de una placa Arduino (Uno Rev3, Italia) conectado a una pantalla LCD (16x2 Hd44780). La presión se midió con un sensor integrado de presión

(MPX5700AP) y el caudal se midió mediante un caudalímetro (Okd-hz43). El esquema del sistema se detalla en la Figura 2.

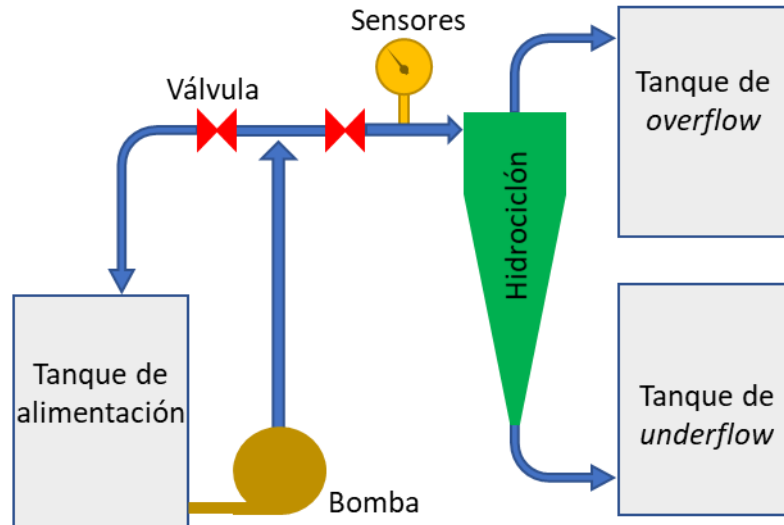


Figura 2. Esquema del sistema. Elaboración propia.

2.5 Funcionamiento y caracterización del sistema

La validación del modelo (Ecuación 1) se llevó a cabo analizando las variables de operación. Las elegidas para esto fueron el caudal (Q) y la fracción volumétrica de sólidos en la alimentación (ϕ). El rango operativo investigado fue desde 5 a 25 L/min y desde 1 a 5 % v/v de concentración. Se realizaron al menos dos ensayos en cada condición de operación y los valores expresados son un promedio de las mismas.

La recuperación de sólidos (R) es la relación entre la tasa de sólidos en una de las corrientes de producto y la tasa de sólidos en la alimentación o como describe la Ecuación 2 [9]. Normalmente se expresa la recuperación de los sólidos de la corriente inferior, pero en este caso la corriente más importante fue la superior.

$$R = \frac{Q_o C_o}{Q \phi} \quad (2)$$

donde Q_o y C_o son el caudal volumétrico y la concentración de sólidos en la corriente de flujo superior (*overflow*), respectivamente.

2.6 Determinación de propiedades

La distribución del tamaño de partícula de las muestras se midió en un analizador de tamaño de partícula láser (LA-960, Horiba Instruments) equipado con muestreador líquido y sonicador, donde la velocidad de circulación y agitación fueron ajustadas en el nivel 10 (de 15). Los índices de refracción utilizados fueron 1.54 para las muestras y 1.33 para el dispersante.

El contenido de almidón total se determinó mediante el kit de almidón total (*Total starch assay kit*, Megazyme, Irlanda).

En ambas determinaciones se expresan los valores como el promedio de los duplicados.

3. Resultados y Discusión

El diámetro de corte se estableció a partir del contenido de almidón del retenido en los tamices. El material con diámetro equivalente menor a $37 \mu\text{m}$ (malla 400) contuvo 89.6% de almidón en base seca (Tabla 2), por lo tanto, este valor fue elegido como d_{50} .

Tabla 2. Contenido de almidón (%) en base seca de los retenidos en cada malla.

Malla ASTM	% Almidón (bs)
50	7,0±0,9
100	35,6±0,8
270	59,4±1,0
400	44,4±0,5
Fondo	89,6±0,8

Las variables de diseño de la geometría tipo Bradley dieron como resultado las siguientes dimensiones: diámetro interno de 8,0 cm, largo total de 54,8 cm y diámetro de 1,0 cm para la entrada. El plano del diseño final del hidrociclón (sin cotas) puede observarse en la Figura 3. El mismo debió dividirse en cuatro partes para su impresión debido a los límites de la impresora. Dos de las uniones son permanentes (Detalles B y C de la Figura 3) y la tercera es una unión brida con un *o-ring* (Detalle D - Figura 3).

En la Tabla 3 se pueden observar los resultados de algunas corridas experimentales donde se cambiaron la concentración y el caudal de la alimentación. Se encontró la mejor separación alimentando el hidrociclón con suspensiones de 1% v/v de harina de sorgo en agua a 25 L/min con una caída de presión (ΔP) de 50 kPa, obteniéndose un producto final de 89,6% de almidón en base seca.

Tabla 3. Caída de presión (ΔP), recuperación de sólidos (R) y porcentaje debajo d_{50} a diferentes caudales (Q) y concentraciones (ϕ).

ϕ (% v/v)	Q (L/min)	ΔP (kPa)	R (%)	Menor a $37 \mu\text{m}$ (%)
5	25	45	47,2	57,1±1,9
1	13	40	63,5	54,1±2,3
1	5	5	39,3	55,7±0,8
1	25	50	70,8	67,3±1,2

En la Figura 4 puede observarse la distribución de partículas de las corrientes de alimentación, *underflow* y *overflow* del hidrociclón en esas condiciones. Puede observarse las partículas con diámetros equivalentes menores a $37 \mu\text{m}$ representan el 67,3% v/v de sólidos de la corriente de *overflow*. La recuperación de sólidos (R) alcanzó el 70,8%, es decir, la mayor parte de los sólidos salieron del equipo por esta corriente. Por lo tanto si se tienen en cuenta ambos factores, se observa que la mayor parte del almidón es obtenida en la corriente de *overflow*.

En la Figura 5 se puede observar la tasa de recuperación de sólidos (R) vs el tamaño de partícula, y podemos observar en esta el tamaño de corte obtenido para estas condiciones de operación ($34 \mu\text{m}$). Se puede ver también que la eficiencia del corte no es muy alta, ya que la curva no alcanza valores cercanos a 0 luego del d_{50} .

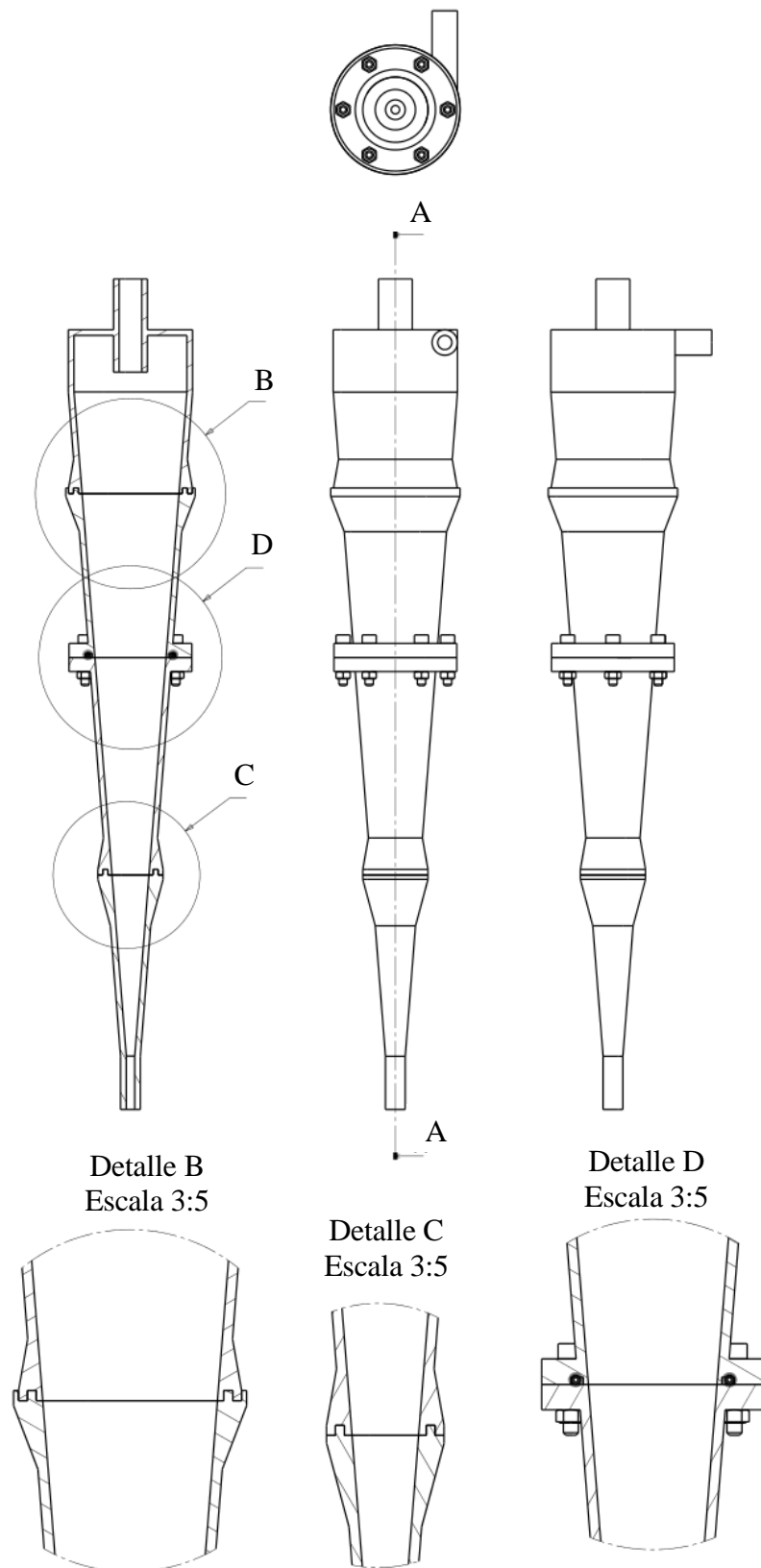


Figura 3. Plano del hidrociclón impreso en 3D. Elaboración propia.

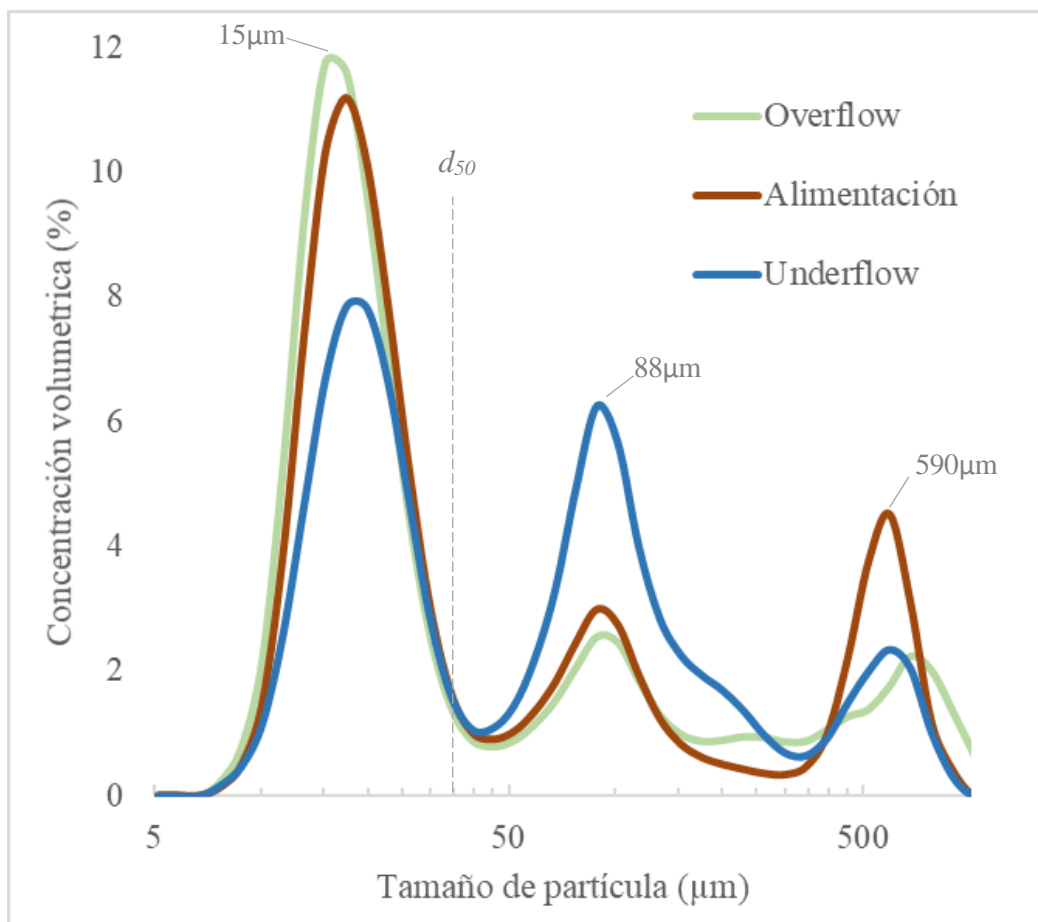


Figura 4. Distribución de tamaño de partículas de las corrientes de alimentación, *underflow* y *overflow* del hidrociclón ($\phi = 1\%$, $Q = 25$ L/min). Elaboración propia.

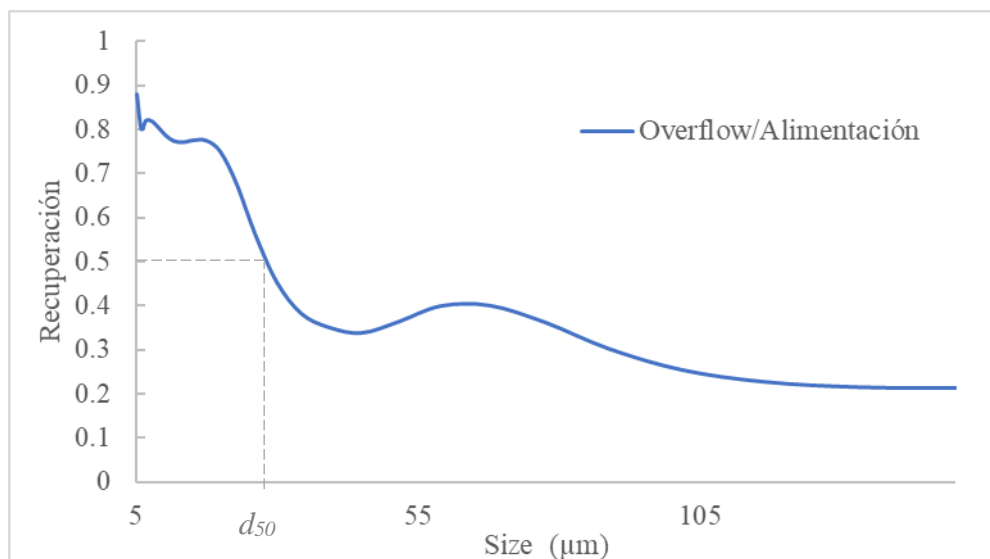


Figura 5. Tasa de recuperación de sólidos (R) vs tamaño de partícula. Elaboración propia.

Las razones de la disminución de la nitidez de separación pueden ser la aparición de direcciones de flujo indeseables dentro del hidrociclón y la formación de una zona concentrada cerca de la superficie del mismo. Esta falta de nitidez se produce especialmente en los casos en que se separan suspensiones que contienen partículas sólidas de diferentes densidades y formas [7]. La harina de sorgo luego de pasar por la etapa de molienda en húmedo consiste en gránulos aislados de almidón, pequeños trozos de endospermo y germen y fibras con formas alargadas y planas. Durante el movimiento giratorio que ocurre en la capa límite hidrociclónica (entre las corrientes ascendente y descendente) las partículas fibrosas son atrapadas y obstaculizadas por las partículas de almidón y les impiden su flujo libre.

4. Conclusiones y recomendaciones

Los resultados indicaron que el comportamiento real del equipo puede predecirse adecuadamente a través de este modelo empírico, por lo que la estrategia de diseño fue adecuada.

El método de construcción aplicando impresión 3D es una alternativa económica y viable para la construcción de prototipos a escala piloto.

Se logró una buena separación del almidón de sorgo mediante el hidrociclón, pero el proceso debe seguir mejorándose, por ejemplo, a través de la instalación de un mayor número de hidrociclones diseñados según los flujos de proceso.

Los pasos siguientes para mejorar el rendimiento del sistema son acoplar una bomba elevadora de presión que va a brindar una mayor fuerza impulsora de separación e incorporar otros ciclones en serie por lo tanto va a permitir mejores rendimientos.

5. Referencias

1. DE MESA-STONESTREET NJ, ALAVI S, BEAN SR (2010) Sorghum Proteins: The Concentration, Isolation, Modification, and Food Applications of Kafirins. *J Food Sci* 75:91–104 .
2. ROONEY L, SERNA-SALDIVAR S (2000) Sorghum. En: Kulp K, Ponte JG (eds) *Handbook of cereal science and technology*, 2nd ed, New York, pp 149–175
3. VAN ESCH F (1991) The Efficiency of Hydrocyclones for the Separation of Different Starches. *Starch - Stärke* 43:427–431.
4. HSIEH KT, RAJAMANI RK (1991) Mathematical Model of the hydrocyclone based on physics of fluid flow. *AIChE J* 37:735–746.
5. SILVA AC, MARIA E, SILVA S, DIOGO J, MATOS V (2012) A modification in plitt's for hydrocyclones simulation. *International Journal of Recent Research and Applied Studies (IJRRAS)*13:753–758.
6. PLITT LR (1976) A mathematical model of the hydrocyclone classifier. *CIM Bulletin* 114–123
7. SVAROVSKY L, THEW MT (2013) *Hydrocyclones Analysis and Applications* Springer Science & Business Media.

Diseño y caracterización de un hidrociclón

8. SINGH N, ECKHOFF S (1995) Hydrocyclone Procedure for Starch-Protein Separation in Laboratory Wet Milling. *Cereal Chem* 72:344–348.
9. SAENGCHAN K, NOPHARATANA A, SONGKASIRI W (2009) Enhancement of tapioca starch separation with a hydrocyclone: effects of apex diameter, feed concentration, and pressure drop on tapioca starch separation with a hydrocyclone. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 48:195–202.