

Caracterización de un Sistema Líquido-Partícula usando Velocimetría por Imágenes de Partículas

Luis Callupe, Samuel Charca

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Ingeniería y Tecnología - UTEC

Jr. Medrano Silva 165, Barranco, Lima-Perú.

Teléfono: +51 (01) 2305000

luis.callupe@utec.edu.pe, scharca@utec.edu.pe

Resumen

En este artículo se estudiaron los fenómenos que se producen en el sistema líquido-partícula conformado por una mezcla de agua y granos de quinua, estando estos dentro de un tambor horizontal giratorio. Para tal fin se utilizó la metodología de velocimetría por imágenes de partículas (Particle Image Velocimetry, PIV); para determinar el comportamiento de los granos durante el régimen estable de movimiento, obteniendo el campo vectorial de desplazamiento y velocidades de los granos. La velocidad angular (rpm) y la longitud de las paletas internas del tambor fueron consideradas en la evaluación del flujo. Las pruebas experimentales mostraron una alta relación entre la velocidad de giro del tambor y las velocidades promedio de los granos, forjando remolinos conocidos como vórtices de campos cerrados ($R_e \leq 6000$). También se observó que el incremento de la longitud en las paletas logra aumentar la formación de vórtices elípticos, los cuales son dirigidos hacia el centro del tambor y colisionan entre sí, formando los vórtices hiperbólicos, lo que ocasiona que aumente la interacción de los granos. Por otro lado, el aumento excesivo de la velocidad de rotación inhibe la formación de los vórtices; debido al aumento de la aceleración normal combinada con la inercia, lo cual sobrepasa el efecto la acción de la gravedad sobre los granos.

Abstract

In this article liquid/particle interaction phenomena was studied, for that purpose water and quinoa seed were mixed in a horizontal drum. Particle Image Velocimetry (PIV) technique was used in order to track quinoa particles and determine the vectorial field, displacement and speed of the particles. Angular velocity and the length of the deflector were the parameters under study. Results show high relationship between the drum rotational speed and the particle speed, forging eddies known as closed field vortices ($R_e \leq 6000$). It was also observed that the increment of length in the deflectors increased the formation of elliptical vortices, which are directed towards the center of the drum and afterwards collide with each other, forming the hyperbolic vortices, which causes an increment in the interaction of the particles. On the other hand, excessive increment of the rotational velocity inhibits the formation of the vortices; due to, the increment of the normal acceleration combined with the inertia, which exceeds the effect of gravitational acceleration in the particles.

Palabras clave:

Vórtices, velocimetría por imágenes de partículas, campo vectorial

Keywords:

Vortices, particle image velocimetry, vector field

Introduction

Los tambores giratorios para sistemas líquido - partícula, son mecanismos muy usados en la industria para los procesos de mezclado, segregado y desbarbado; por lo que, entender el comportamiento del flujo que se forma durante la rotación del tambor es importante para las aplicaciones industriales [1]. Parámetros como la velocidad de colisión entre partículas y/o la interacción de las partículas con las paredes internas de tambor, son determinantes para evaluar la funcionalidad del mecanismo. Es ideal que el sistema contenga una alta concentración de partículas, con el propósito de mejorar la interacción entre ellas; por otro lado, un alto número de partículas aumenta la sedimentación; lo que dificulta los procesos industriales; puesto que, se requerirá de mayor fuerza para mantener las partículas suspendidas. En el 2016, Yunfu Chen y Cheng Yu, realizaron pruebas experimentales en un tambor giratorio de 195 mm de diámetro, mezclado con agua

y partículas de diámetro 1.5 mm; mostrando que a mayor velocidad de giro, mejora significativamente el rendimiento de la mezcla, pues las partículas se mantienen en suspensión por mayor tiempo, logrando desplazarse a las zonas donde se forman los vórtices [2].

Con una mayor interacción de las partículas los procesos de mezcla y desbarbado se efectúan de manera eficiente, esto se logra provocando la formación del mayor número posible de vórtices. Desafortunadamente, debido a la complejidad del fenómeno que se genera a causa del comportamiento caótico, es imposible obtener soluciones analíticas [3]. Una manera de describir el comportamiento del flujo caótico es cuantificando y cualificando la formación de vórtices experimentalmente [4], esto daría una mejor aproximación para describir una configuración ideal del fenómeno. En los últimos años

con el desarrollo de la tecnología y el desarrollo del método de correlación de imágenes digitales fue factible monitorear desplazamientos y movimiento de partículas. Una de estas herramientas es la Velocimetría por Imágenes de Partículas (Particle Image Velocimetry PIV). El PIV es una técnica de medición cuantitativa, que permite obtener información de la velocidad y desplazamiento de partículas en movimiento lineal y/o rotatorio, al comparar dos imágenes captadas en instantes de tiempo diferente [5]. Este par de imágenes, produce un campo de vectores de desplazamiento lineal, donde cada vector se obtiene examinando el movimiento de las partículas [6]. A diferencia del monitoreo de fluidos que requieren hoja laser, la presencia de partículas en la mezcla facilita la identificación y seguimientos de estas sin la necesidad de herramientas adicionales como la hoja laser [6].

La presente investigación tiene como objetivo la caracterización del flujo conformado por la mezcla entre agua y granos de quinua en un tambor rotatorio, mediante el método de Velocimetría por Imágenes de Partículas. Se estudiaron los efectos de la velocidad de rotación y el tamaño de las paletas que generan la formación de vórtices, los cuales producen la interacción de granos quinua-quinua; de esta manera reducir el tiempo de remoción de saponina superficial de la quinua por interacción.

Materiales y metodología.

Para este estudio se utilizó una mezcla de partícula (quinua) y agua con una relación 1:1 en peso. Con el propósito de evitar la variabilidad en los resultados, se utilizó agua destilada para todas las pruebas y la misma variedad de quinua. Para el monitoreo de las partículas de quinua, se diseñó y fabricó una mezcladora horizontal de acrílico de 150 mm de diámetro y 50 mm de profundidad, impulsada por un motor DC el cual cuenta con un regulador de velocidad. Además, se incluyó cuatro paletas con 90° de ángulo de ataque, las cuales tienen la función de generar turbulencia. La Figura 1 detalla el diagrama de diseño desarrollado.

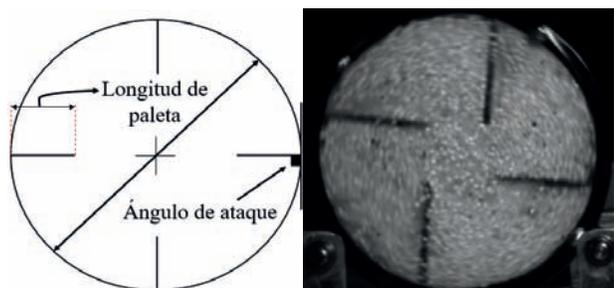


Figura 1: Prototipo de tambor giratorio para las pruebas experimentales.

Materiales.

Para las pruebas experimentales, se utilizó el tipo de quinua Amarilla Marangani procedente del departamento de Cusco – Perú. Con un tamaño de 2 mm de diámetro, esta variedad de quinua es de sabor amargo debido a la alta cantidad de saponina (7% de saponina en peso) [7] [8], La saponina es

una capa que envuelve al grano de quinua y es de sabor desagradable; además, no es apto para el consumo humano [9], es por ello la necesidad de removerlo por lavado.

Metodología.

Una vez alcanzada el estado estable de movimiento de partículas en la mezcladora, se procedió a la toma de imágenes alrededor de 1000 imágenes (suficientes para asegurar que las partículas viajen alrededor del tambor). La captura de imágenes se realizó con una cámara (Genie Nano M1280) de alta velocidad (200 cuadros por segundo) y una resolución de 560×552 pixeles. Para asegurar la toma adecuada de imágenes, la cámara fue ubicada a 800 mm de la mezcladora, asegurándose que la sección circular de la mezcladora y el lente de la cámara estén paralelos. Con el objetivo de asegurar la identificación de las partículas de quinua, se utilizó un lente Nikon AF-S cuyo tamaño ocular se encuentra en el rango de 18 a 300 mm. Para mejorar el contraste y la resolución de las imágenes una lámpara de luz blanca proyectada hacia la sección circular de la mezcladora fue usada; sin embargo, es probable que las imágenes muestren distorsión en las zonas de contraste entre granos producto del ruido del sensor de la cámara. Un método para mejorar la imagen se basa en eliminar las frecuencias de bajo valor producto del ruido de la cámara [6]; por lo que, el uso de un filtro de paso alto (highpass filter) mejoró la resolución en el contraste de las partículas [10]; de esta manera, el seguimiento de las partículas fue más representativo.

La Tabla 1 muestra la matriz experimental de las pruebas desarrolladas, considerando la velocidad del tambor y la longitud de paletas como parámetros de estudio.

Tabla 1: Matriz experimental de la relación de la velocidad (rpm) del tambor y la longitud de paletas (mm).

rpm tambor	Longitud de paletas (mm)				
	10	20	30	40	50
13 (1,36 rad/s)	x	x	x	x	x
40 (4,16 rad/s)	x	x	x	x	x
60 (6,28 rad/s)	x	x	x	x	x
80 (8,37 rad/s)	x	x	x	x	x

Calibración.

Para el análisis y la obtención del campo vectorial de velocidades se utilizó el software PIVlab desarrollado por Willian Thielicke [5]. Con el objeto de asegurar la validez de los resultados, se realizó la calibración y validación de resultados usando partículas de quinua en caída libre, donde los resultados obtenidos por PIV se compararon con los valores obtenidos utilizando la ecuación de caída libre. La Figura 2, muestra las imágenes tomadas en diferentes tiempos de caída libre.

La Figura 3, muestra los resultados obtenidos usando PIV y valores teóricos. Es evidente que las primeras dos medidas

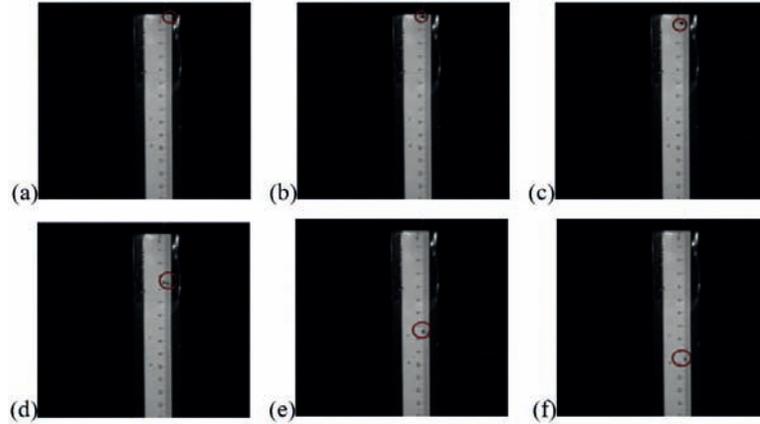


Figura 2: (a) grano iniciando la caída libre, (b) grano con ~2 mm de recorrido, (c) grano con ~4 mm de recorrido, (d) grano con ~37 mm de recorrido, (e) grano con ~76 mm de recorrido, (f) grano con ~96 mm de recorrido.

presentan un porcentaje de error menor a 3%, la tercera medida llega a un error del ~5%; sin embargo, en las siguientes tres últimas mediciones el error aumenta considerablemente; esto se debe a que, al aumentar la velocidad de caída, una partícula es capturada en un conjunto lineal de píxeles, esto por la naturaleza del sensor de la cámara. Provocando de esta manera la dispersión de los resultados [6]; por consiguiente, el aumento del error. Los valores de velocidad obtenidos en sistema líquido-partícula están en el rango de 200 a 800 mm/s, esto garantiza errores menores al 5% en todas las mediciones, lo cual se detallarán en lo posterior.

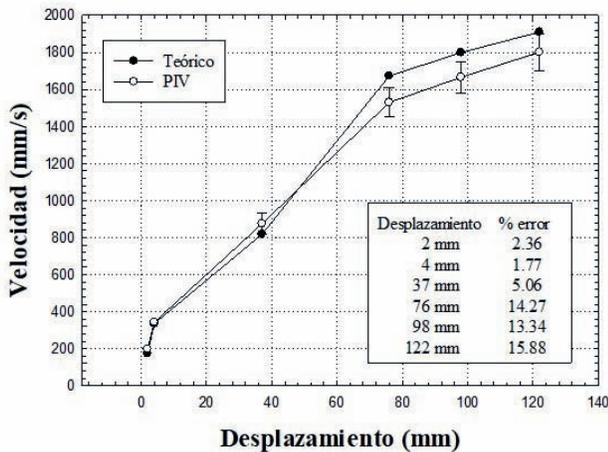


Figura 3: Diagrama comparativo de la velocidad teórica y la velocidad estimada usando PIV.

Resultados y análisis.

A continuación, se detallan la influencia que generan las velocidades angulares y las longitudes de las paletas, en el sistema líquido-partícula. Los fenómenos que se producen durante el régimen estable de movimiento del tambor, son considerados para la medición de los granos de quinua y la caracterización del flujo.

Efecto de la velocidad angular.

Del análisis de PIV, se obtuvieron el perfil vectorial de velocidades de todas las partículas, indistinta de su dirección, con estos valores en diferentes estados se procedió a determinar la velocidad promedio de las partículas en toda la sección circular. La Figura 4, muestra la velocidad promedio de las partículas para las diferentes velocidades (rpm). El aumento en la velocidad angular (rpm), provoca una mayor velocidad tangencial del tambor consecuentemente, aumentando la velocidad promedio de las partículas (granos de quinua), es evidente que la velocidad promedio de las partículas no coincide con la velocidad tangencial de la pared del tambor, esto se debe a que, los granos de quinua no están en contacto con la pared del tambor, debido a que, tienen una capa de lubricación de líquido presente [11]. Sin embargo, a bajas velocidades angulares, son muy similares estas velocidades. Por consiguiente, se puede asumir en algunos casos, que la ecuación ωr_c ($r_c =$ radio interno del tambor) es una estimación razonable de la velocidad promedio de las partículas [12].

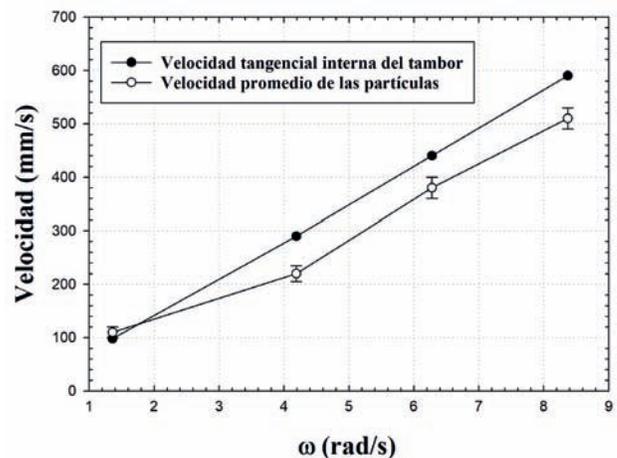


Figura 4: Influencia de la velocidad angular del tambor hacia los granos de quinua.

Efecto de las longitudes de las paletas

El efecto en el aumento de las longitudes de las paletas, presentan un aumento progresivo de la velocidad angular de las partículas de hasta un 20 % a una velocidad de rotación de 8,26 rad/s (80 rpm), como se observa en la Figura 5. Una velocidad de rotación baja 1,36 rad/s (13 rpm), no consigue romper la sedimentación de las partículas, provocando un efecto mínimo en la mezcla (fluido no newtoniano). Conforme la velocidad aumenta, la relación $v - \omega$ tiende a ser lineal (fluido newtoniano); esto se debe a que, al aumentar la velocidad de rotación del tambor, logra que las partículas tengan mayor velocidad, consecuencia de la formación delgada de la capa límite que se produce en la superficie de las paletas [13], además, el aumento del tamaño de paletas, provoca un aumento en la longitud de la capa límite, manteniendo las partículas en suspensión, aumentando la interacción entre granos, lo cual es ideal para procesos de lavado, desbarbado, mezclado, entre otros [14]. Sin embargo, al aumentar excesivamente la longitud de las paletas, estas generarán la formación de cámaras (cuatro) reduciendo la interacción entre partículas.

EDICIÓN DIGITAL

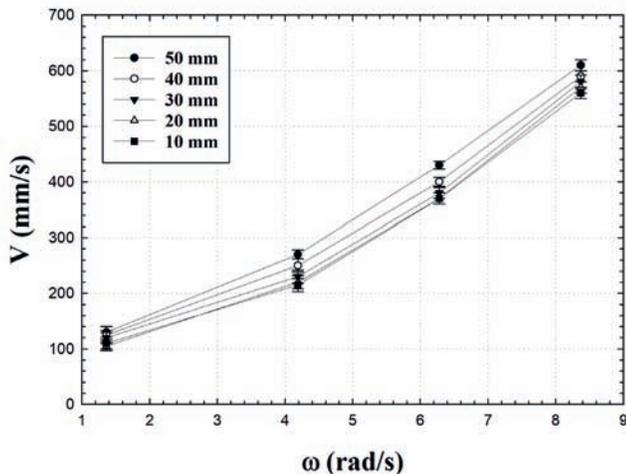


Figura 5: Influencia de la longitud de los agitadores, como función de la velocidad angular.

Efecto de la velocidad y longitud de las paletas en el número Reynolds (Re) del sistema.

Según la definición de la mecánica de los fluidos, el número de Reynolds es un parámetro adimensional que caracteriza el comportamiento de un fluido [15]. Para recipientes que tienen la función de mezclado, los flujos característicos son flujos inversos/reciprocante $Re < 10$, flujo laminar ~ 10 , flujo en transición $100 < Re < 104$ [16] [17]. De los resultados obtenidos de velocidad y usando la ecuación 1 [13] [11], se determinó el número de Reynolds en función de la velocidad angular, la geometría del tambor y la longitud de paleta.

$$Re = \frac{\omega r_c L}{\nu} \quad (1)$$

Siendo ν la viscosidad cinemática de la mezcla, ω la velocidad angular del tambor, L longitud de las paletas y r_c radio interno del tambor. Para este análisis se consideró como dato de entrada la viscosidad cinemática de la mezcla como agua y quinua (15 cSt), con una densidad de $1.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ obtenidas por Benvenuto y colaboradores [18].

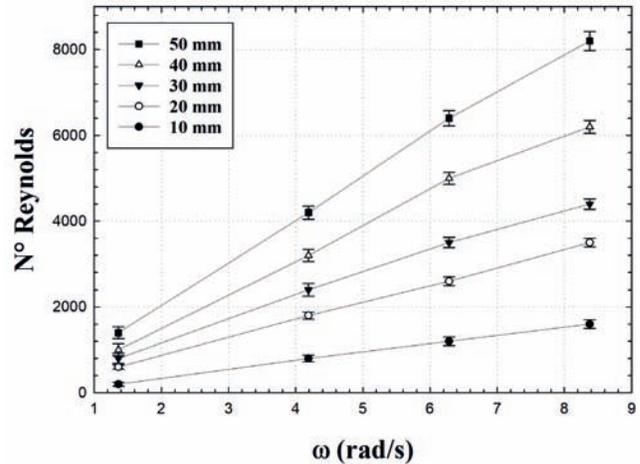


Figura 6: No de Reynolds en función de la velocidad angular, geometría del tambor y longitud de paleta.

Los valores de número de Reynolds para las diferentes configuraciones experimentales descritas en la Tabla 1, se muestra en la Figura 6. De los resultados se observa que todos los valores de número de Reynolds determinados se encuentran en régimen de transición. Por otro lado, algunos autores definen dos áreas de régimen transitorio, siendo el de menor Reynolds el "parcialmente caótico" y el de mayor Reynolds el "doublet" [11] [19]. Según lo estimado, a mayores longitudes de las paletas, el número de Reynolds aumenta, de esta manera se aumenta el nivel del caos, conveniente para sistemas de lavado de granos. Un detalle en particular que se pudo observar es el comportamiento de los vórtices en campos cerrados, las características de estos vórtices se explicarán a continuación.

Vórtices en campos cerrados

La forma y característica de los vórtices vienen a ser parámetros que determinan una buena interacción partícula-partícula, conveniente para este estudio. Las Figuras 7 y 8, muestran dos tipos de vórtices formados por el campo vectorial de las gradientes de velocidad instantánea; los vórtices de geometría elíptica (Figura 7), se forman por el cambio de la gradiente de velocidad en la superficie de las paletas para luego dirigirse hacia el centro, una característica de estos vórtices es su punto de estancamiento que se encuentra en el centro del vórtice donde el campo de velocidad es o se aproxima a cero [4]; este vórtice, al llegar al centro colisiona con otros vórtices, formando la geometría de punto hiperbólico o también llamado vórtice hiperbólico (Figura 8), cuyo punto de estancamiento se presenta en la zona de mayor esfuerzo, es decir, en la zona donde los campos de velocidad son ma-

yores [4], esta particularidad es muy dependiente tanto de la velocidad angular y la longitud de los agitadores, siendo la velocidad 60 rpm (6,283 rad/s) y 50 mm de longitud de paleta las que presentan mayor cantidad de formación de vórtices. Sin embargo, al ser de mayor tamaño las paletas (>50 mm), el flujo caótico se reduce; debido a que, el volumen de mezcla se divide en pequeñas cámaras [20], reduciendo la interacción partícula-partícula.

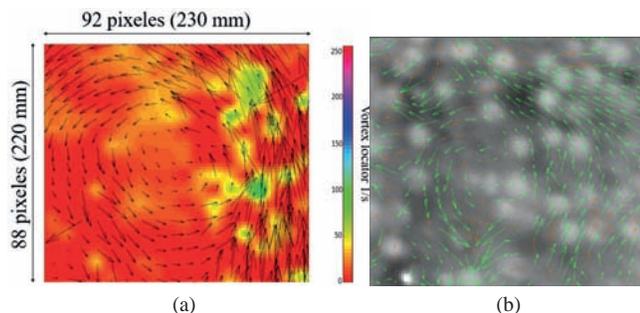


Figura 7: (a) Vórtice elíptico, formado por el campo vectorial de la gradiente de velocidad instantánea de la superficie de las paletas (50 mm long. agitador a 60 rpm), (b) imagen de las partículas en suspensión.

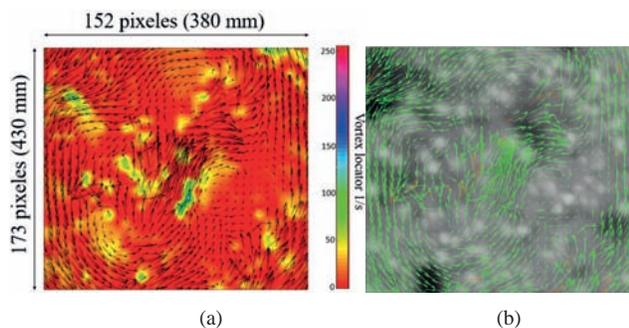


Figura 8: (a) Punto hiperbólico, formado por el campo vectorial instantánea, consecuencia del choque entre 4 vórtices (50 mm long. paletas a 60 rpm), (b) imagen de las partículas en suspensión.

Para los procesos de lavado de granos, es fundamental que la formación de vórtices sea alta; puesto que, garantiza un mayor contacto entre granos; ocasionando que la saponina sea extraída de la superficie de la quinua. Una prueba afrosimétrica realizada a los granos de quinua después del lavado [21], arrojaron que el contenido de saponina se redujo a 2,358%. Por otro lado, se observó que a mayores velocidades (>60 rpm) el choque entre vórtices elípticos va reduciendo gradualmente hasta desaparecer, lo que ocasiona que los granos queden suspendidos en las paredes internas del tambor, consecuencia de que la inercia de los granos combinada con la aceleración normal sobrepasa el efecto de la gravedad [22] [23], reduciendo a cero el número de vórtices. La Figura 9 muestra la formación de vórtices en un corto periodo de tiempo (~0.106 segundos) para todos los casos.

Conclusiones

El comportamiento del flujo conformado por quinua y agua, mediante la técnica de velocimetría por imágenes de partículas, propone una mejor evaluación dinámica del comportamiento del flujo; incluso, proporciona un mejor entendi-

miento cualitativo de la formación de vórtices durante el proceso de lavado. El estudio del flujo durante el proceso de lavado para el sistema líquido-partícula, sometido a movimientos rotatorios (60 rpm de velocidad angular) y con 4 paletas de 50 mm, muestra el comportamiento del flujo en estado “parcialmente caótico y/o doublet”, con un número de Reynolds (~6000) relativamente alto, donde los granos están en suspensión, lo cual garantiza la interacción entre granos (partícula/partícula), consecuencia de los vórtices que se forman y chocan entre sí; logrando así el desprendimiento acelerado de saponina en los granos de quinua (reducción de 7% a 2,358%). No obstante, si la velocidad angular aumentase (~80 rpm), la formación de vórtices desaparece por completo, debido al aumento de la aceleración normal que sobrepasa el efecto de la gravedad, ocasionando que los granos de quinua queden suspendidos en la pared del tambor, reduciendo la interacción de las partículas. Si bien las pruebas se han realizado en la superficie del tambor (2D), es una buena aproximación de lo ocurrido en otras secciones dentro del tambor.

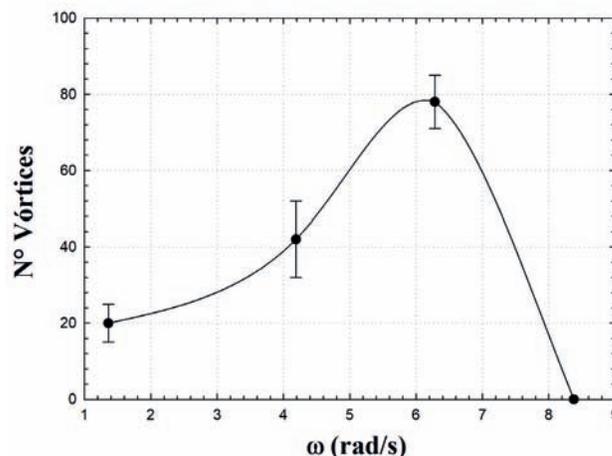


Figura 9: Formación de vórtices producto de la velocidad angular del tambor y paleta a 50 mm longitud.

Agradecimientos

Este estudio fue desarrollado gracias al apoyo del Departamento de Ingeniería Mecánica, de la Universidad de Ingeniería y Tecnología – UTEC en colaboración con el grupo de investigación de Mecánica Experimental.

Referencias

- [1] Lyn, D. A., Einav, S., Rodi, W., & Park, J. H. (1995). *A laser-Doppler velocimetry study of ensemble-averaged characteristics of the turbulent near wake of a square cylinder*. Journal of Fluid Mechanics, 304, 285-319.
- [2] Chen, Y., Yu, C., Liu, M., Chen, S., & Chen, Y. (2016). *Particle dispersion in a partially filled rotating cylindrical tank*. Chemical Engineering Research and Design, 111, 1-12.

- [3] Baker, G. L., Baker, G. L., & Gollub, J. P. (1996). *Chaotic dynamics: an introduction*. Cambridge University Press.
- [4] Ouellette, N. T., & Gollub, J. P. (2008). *Dynamic topology in spatiotemporal chaos*. Physics of Fluids, 20(6), 064104.
- [5] Thielicke, W., & Stamhuis, E. (2014). *PIVlab—towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB*. Journal of Open Research Software, 2(1).
- [6] Raffel, M., Willert, C. E., Scarano, F., Kähler, C. J., We-reley, S. T., & Kompenhans, J. (2018). *Particle image velocimetry: a practical guide*. Springer.
- [7] Apaza Mamani, V., Cáceres Sanizo, G., Estrada Zuñiga, R., Taco, P., & Emilio, R. (2013). *Catálogo de variedades comerciales de quinua en el Perú*.
- [8] Arias, L. (2002) *Determinación del Contenido Proteico en Mutantes de Quinua (Chenopodium quinoa wild) variedad la Molina 89 por Espectroscopia de Transmiancia en el Infrarrojo Cercano*, Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, Perú.
- [9] Tamura, Y., Miyakoshi, M., & Yamamoto, M. (2012). *Application of saponin-containing plants in foods and cosmetics*. In Alternative Medicine. InTech.
- [10] Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2007). *Image processing*. Digital image processing, 2.
- [11] Davidheiser, J. E., Syers, P., Segrè, P. N., & Weeks, E. R. (2010). *Complex dynamics of three interacting spheres in a rotating drum*. Physics of fluids, 22(3), 033305.
- [12] Mullin, T., Li, Y., Del Pino, C., & Ashmore, J. (2005). *An experimental study of fixed points and chaos in the motion of spheres in a Stokes flow*. IMA journal of applied mathematics, 70(5), 666-676.
- [13] Yunus, A. C., & Cimbala, J. M. (2006). *Fluid mechanics fundamentals and applications*. International Edition, McGraw Hill Publication, 185201.
- [14] Tiwari, B., & Cullen, P. J. (2009). *3 Kinematics of flow and mixing mechanisms*. Food Mixing: Principles and Applications, 21.
- [15] Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos*. Pearson educación.
- [16] Cullen, P. J. (Ed.). (2009). *Food mixing: Principles and applications*. John Wiley & Sons.
- [17] Freund, J. B., Goetz, J. G., Hill, K. L., & Vermot, J. (2012). *Fluid flows and forces in development: functions, features and biophysical principles*. Development, 139(7), 1229-1245.
- [18] Benvenuto, D. (1972) *Elaboración de una Bebida Proteica a Base de Quinua (Chenopodium Quinoa Wild)*, Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, Perú.
- [19] Rice, M. J. (2011). *High resolution simulation of laminar and transitional flows in a mixing vessel* (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- [20] Cullen, P. J. (Ed.). (2009). *Food mixing: Principles and applications*. John Wiley & Sons.
- [21] Koziol, M. J. (1991). *Afrosimetric estimation of threshold saponin concentration for bitterness in quinoa (Chenopodium quinoa Willd)*. Journal of the Science of Food and Agriculture, 54(2), 211-219.
- [22] Aguado Alonso, J., & Rodríguez Somolinos, F. (1999). *Ingeniería de la industria alimentaria*.
- [23] Turner, J. L., & Nakagawa, M. (2000). *Particle mixing in a nearly filled horizontal cylinder through phase inversion*. Powder technology, 113(1-2), 119-123.