

Proceso de descarga de un silo como una línea continua de ruido

J. R. Hernández-Juárez*, A. López-Villa, A. Medina, and V. Barroso

Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME Azcapotzalco,

Av. de las Granjas 682, Col. Santa Catarina, Azcapotzalco 02250, Mexico City, Mexico.

**e-mail: jhernandezj@ipn.mx*

Received 18 February 2020; accepted 8 May 2020

Durante el proceso de descarga de un material granular desde un silo, pueden surgir fenómenos de resonancia como la emisión de ondas acústicas. Esta contribución acústica es debida a la fricción entre los granos y la pared del silo acoplada con la generación y amplificación de ondas mecánicas. En este trabajo se presentan algunos resultados experimentales correspondientes al proceso de descarga del silo considerado como una línea continua de ruido donde los patrones de radiación de la energía acústica dan cuenta de los efectos adversos como la contaminación acústica. Se propone que estos resultados son un análisis alternativo para evitar efectos acústicos no deseados en el proceso de descarga de silos.

Descriptores: Material granular; ondas acústicas; fuente de ruido; contaminación acústica; patrones de radiación

During the process of unloading a granular material from a silo, resonance phenomena such as wave emission can arise acoustic. This acoustic contribution is due to the friction between the grains and the silo wall coupled with generation and amplification of mechanical waves. This work presents some experimental results corresponding to the unloading process of the silo considered as a continuous line of noise where acoustic energy radiation patterns account for adverse effects such as acoustic contamination. It is proposed that these results are an alternative analysis to avoid unwanted acoustic effects in the process silos unloading.

Keywords: Granular material; acoustic waves; noise source; acoustic contamination; radiation patterns

PACS: 43.25.Qp; 43.20.Fn; 43.20.Bi; 45.70.Mg; 45.70.-n.

1. Introducción

La presencia de perturbaciones de naturaleza acústica durante el proceso de descarga de un medio granular confinado en un contenedor como lo es un silo, es un fenómeno físico de gran interés para el diseño de silos y para el entendimiento de la física de los medios granulares en general [13]. Este fenómeno conocido en la literatura como silo honking o silo music ha sido estudiado en algunos excelentes trabajos experimentales cuyos resultados han sido registrados y reportados por Tejchman [7,11,12] y Kesava Rao [1,4,6] entre otros. La descarga debida solamente al efecto de la gravedad de un medio granular contenido en un silo es la causa de la presencia de dos fenómenos físicos de importancia relevante. El primero de estos fenómenos se asocia con la propagación de ondas acústicas y el segundo con la transmisión de ondas mecánicas en la estructura del silo. Las ondas acústicas generadas por la descarga del silo son la causa de contaminación acústica y el fenómeno asociado a las ondas mecánicas provoca la fatiga y daño de las estructuras que soportan y sostienen al silo [10].

En este trabajo, el interés se centra en el análisis de la contaminación ambiental proveniente del ruido acústico. La Organización Mundial de la Salud apunta que 20% de la población se expone a niveles mayores de 65 dB de contribución de ruidos de naturaleza acústica durante el día y considera que el nivel máximo permisible de exposición es de 70 dB en la curva de ponderación A (ver [5,9]). Los datos anteriores son una referencia general que permite el análisis de los niveles de ruido generados por el proceso de descarga de un material granular a través de un silo en posición verti-

cal e inclinado, que es el principal objeto de estudio de este trabajo.

2. Experimentos de silo honking

Para la realización de los experimentos, se consideró un silo de vidrio a escala de laboratorio de las siguientes características. El fondo del silo es un hopper con una salida circular concéntrica de diámetro: $D = 0.8$ cm, longitud: 45.6 cm, diámetro exterior: 4.5 cm, diámetro interior: 3.6 cm, espesor de pared: 0.9 cm, con terminado de superficie suave de pared. La frecuencia de resonancia $f_{rec_{reso}}$ medida del silo fue de 178.8 Hz. El material granular implementado en los experimentos es un tipo de arena sílica con un diámetro promedio (d_p) de 0.21 mm, densidad de bulto (ρ) de 1.81 gr/cm³ y un ángulo de reposo (ϕ_r) de 28°. El cálculo del flujo másico del material granular a través del silo considerando la influencia de la componente gravitacional esta dada por [16,17]

$$\dot{m}_\theta = \rho g^{1/2} D^{5/2} \sin \theta, \quad (1)$$

donde g es la aceleración de la gravedad en cm/s² y el θ es el ángulo de inclinación del silo con respecto al plano horizontal. Mientras que la velocidad de descarga U_θ del medio granular a través del orificio de salida D se relaciona con \dot{m}_θ como

$$U_\theta(\dot{m}) = \frac{\dot{m}_\theta}{\rho A}, \quad (2)$$

donde A es el área del orificio de salida en la parte inferior del silo. Al combinar las expresiones (1) y (2) se establece que la velocidad de descarga del medio granular a través del

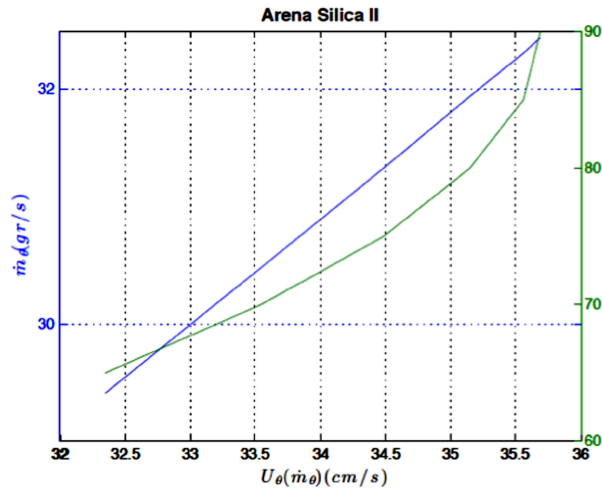


FIGURA 1. Valores de \dot{m}_θ obtenidos de (1) se muestran en el eje vertical izquierdo. Los valores de (θ) corresponden al eje vertical derecho. Finalmente, los valores de U_θ calculados de (2) se indican en el eje horizontal.

orificio depende tanto del diámetro D y el ángulo de inclinación θ . Con las expresiones anteriores es posible realizar un análisis de estimación del flujo másico y la velocidad de descarga sustituyendo las características físicas del medio granular y del silo. Los valores obtenidos de (1) y (2) son de importancia relevante para el análisis de las señales acústicas emitidas durante la descarga del silo, un análisis más profundo puede ser consultado en [16]. El comportamiento de U_θ y \dot{m}_θ para el flujo del material granular a través del silo se describe en las curvas mostradas en la Fig. 1. El comportamiento de la velocidad de descarga U_θ (línea azul) es lineal por dos razones principales: El valor constante de g y el cumplimiento de la condición $D > 6d_p$ [17].

3. Señales en el dominio de la frecuencia

Las contribuciones acústicas generadas durante la descarga del material granular son señales de cambio de amplitud de voltaje adquiridas por medio de un sensor de sonido (Sound Sensor Pasco CI-6506B) que se encuentran en el dominio del tiempo, lo que permite conocer el tiempo de descarga durante cada experimento con el material granular. Sin embargo, las señales en el dominio del tiempo no son suficientes para un análisis más profundo de las contribuciones acústicas de este fenómeno. Para adquirir información relevante del fenómeno en el dominio de la frecuencia se requiere aplicar la transformada de Fourier vía el algoritmo Transformada Rápida de Fourier (FFT) [2,14,15]. La Fig. 2 muestra la sección de la contribución acústica de la señal en el tiempo. Se observa cierta periodicidad sin cambios drásticos de amplitudes. A esta señal en el dominio del tiempo se le aplica la Transformada Rápida de Fourier. De este análisis se obtiene que la señal acústica que corresponde al proceso de descarga de un silo vertical contiene una frecuencia dominante de 32.03 Hz. Este análisis se repite para las descargas del silo a diferentes ángulos de inclinación con respecto a la horizontal. Así, las

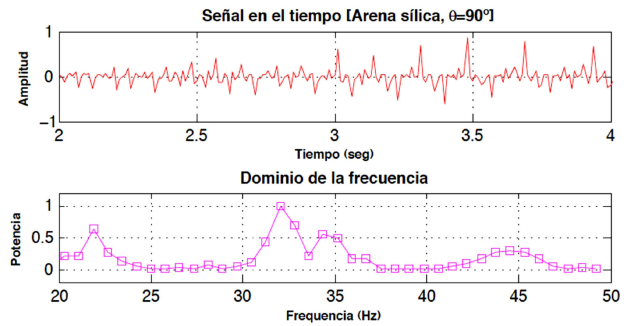


FIGURA 2. Arriba: Sección de la señal acústica. Abajo: Componentes en frecuencias de la señal acústica. Cuando el silo se encuentra en posición vertical ($\theta = 90^\circ$).

frecuencias fundamentales para diferentes valores de θ son: 28.12 Hz ($\theta = 85^\circ$), 27.54 Hz ($\theta = 80^\circ$), 25.78 Hz ($\theta = 75^\circ$). Estos valores enlistados corresponden a inclinaciones del silo donde las descargas presentaron contribuciones acústicas. Por la naturaleza del fenómeno y de los resultados reportados en la literatura especializada, se estima que la mayor contribución de energía se encuentra debajo de los 1000 Hz. Sin embargo, los resultados dependerán de las características físicas del medio granular, del silo, de la humedad y la temperatura. Otro factor importante es la respuesta en frecuencia del sensor de sonido, el cual limita el ancho de banda de las frecuencias encontradas. La frecuencia de respuesta del sensor utilizado en estos experimentos tiene un rango de 20 Hz a 7.2 kHz. Las ondas acústicas emitidas también se relacionan con el tamaño del grano y con la longitud de onda de las ondas acústicas. Por el momento, algunas hipótesis son ideas primarias de un mecanismo más complejo de la generación de ondas acústicas en la descarga de medios granulares en silos. Un escenario completo requiere un estudio teórico y experimental que sea capaz de predecir y replicar casos particulares de este fenómeno.

4. Patrones de radiación

El interés del análisis de las señales en el tiempo y la frecuencia del fenómeno acústico en la descarga de un silo vertical o inclinado se enfoca en la descripción de los niveles de ruido generados por las contribuciones acústicas del fenómeno. Una parte importante del análisis del ruido se resuelve representando e interpretando los patrones de radiación de energía acústica en coordenadas polares. Las gráficas polares son de utilidad en el estudio de diferentes fenómenos acústicos como es mencionado en [5,8], y en fenómenos electromagnéticos para el estudio de radiación de antenas [18]. Las direcciones de radiación van de 0° a 360° y los círculos concéntricos son intensidades en dB. Los patrones de radiación se obtienen a partir de la representación gráfica de las siguientes expresiones

$$b(\alpha) = 20\log_{10}H(\alpha), \tag{3}$$

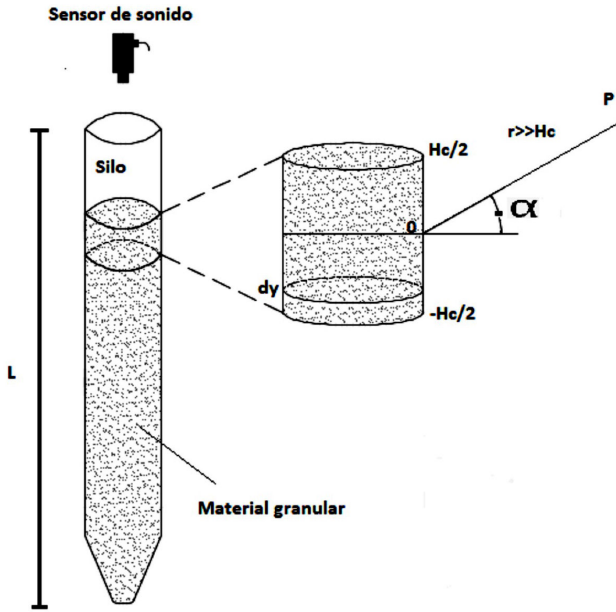


FIGURA 3. Representación del silo como una línea continua de ruido.

donde

$$H(\alpha) = \left| \frac{\sin v}{v} \right|, \tag{4}$$

$$v = \frac{1}{2} k H_c \sin(\alpha). \tag{5}$$

Estas expresiones surgen de considerar una porción de la longitud del silo como una fuente cilíndrica de longitud H_c (sección donde se producen las contribuciones acústicas) y radio δ (radio interior del silo). Infiriendo que la superficie del silo vibra radialmente se considera un elemento diferencial dy . Cada uno de estos elementos genera incrementos de presión a un punto de referencia P a una distancia $r \gg H_c$. Siendo $k = \omega/c$ el número de onda, $c = 340$ m/s la velocidad del sonido, $\omega = 2\pi f_1$ la frecuencia angular, f_1 es la frecuencia dominante de la contribución acústica presente en la descarga del silo a un ángulo θ de inclinación específico con respecto a la horizontal. H_c es la altura crítica donde se presenta la contribución acústica, que es una porción de la longitud L del silo. Y α es el ángulo de línea de vista que para todos los casos se eligió $\alpha = 30^\circ$. El ángulo de vista se toma sobre la horizontal que es perpendicular al eje vertical y del silo y que tiene origen en $H_c/2 - H_c/2$. En la Fig. 4 se observan los patrones de radiación para la contribución acústica de la descarga del silo vertical con $\theta = 90^\circ$ y con inclinación para $\theta = 85^\circ$. Ambos patrones no privilegian alguna dirección de propagación específica, radiando energía acústica con intensidad similar en todas las direcciones por el gran número de nulos y picos presentes. Se deduce una ausencia de lóbulos principales. Sin embargo para $\theta = 90^\circ$ se presentan algunos picos de amplitud relevante para una dirección de 325° y 150° .

En el caso de $\theta = 85^\circ$, se encuentran dos picos considerables de amplitud en la dirección 220° y 250° . Las intensi-

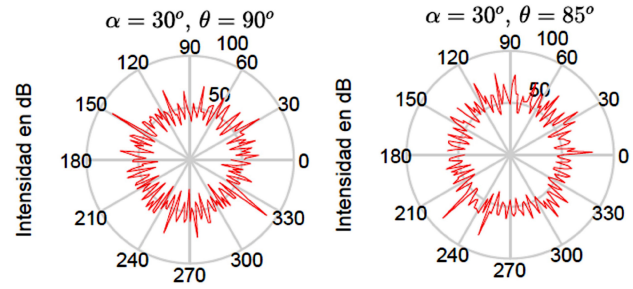


FIGURA 4. Gráficas polares de los patrones de radiación de la energía acústicas $b(\alpha)$ para una línea de vista $\alpha = 30^\circ$ durante el proceso de descarga del silo. Izquierda, silo con ángulo de inclinación $\theta = 90^\circ$. Derecha, silo con ángulo de inclinación $\theta = 85^\circ$.

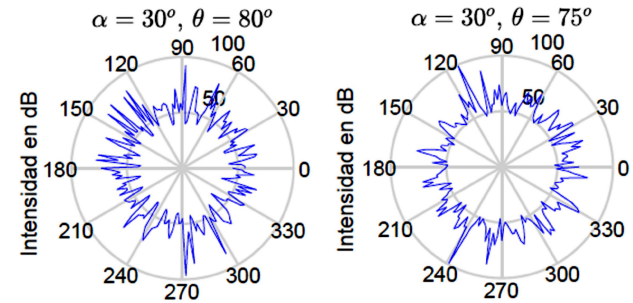


FIGURE 5. Gráficas polares de los patrones de radiación de la energía acústicas $b(\alpha)$ para una línea de vista $\alpha = 30^\circ$ durante el proceso de descarga del silo. Izquierda, silo con ángulo de inclinación $\theta = 80^\circ$. Derecha, silo con ángulo de inclinación $\theta = 75^\circ$.

dades están dadas en dB y estos valores pueden ser diferentes dependiendo del ángulo de línea de vista α y la distancia de P . Un análisis similar puede seguirse para los patrones de radiación de $\theta = 80^\circ$ y $\theta = 75^\circ$, donde no se observa algún lóbulo principal que privilegie alguna dirección de radiación en específico. Aunque, como en el caso anterior se observan algunos picos de mayor amplitud en ciertas direcciones.

La observación principal de las gráficas polares anteriores indica que la energía acústica se irradia con intensidad similar en cualquier dirección.

5. Conclusiones

Este trabajo se ha centrado en el análisis del ruido generado durante la descarga de un material específico en un silo que se encuentra en posición vertical o a un ángulo dado de inclinación con respecto al plano horizontal. Así, de acuerdo con los resultados mostrados en las secciones anteriores se comprueba que el fenómeno de descarga de un silo que produce el llamado silo honking es una fuente de ruido considerable de contaminación ambiental. El mecanismo de la generación de ondas acústicas en el silo se entiende debido al fenómeno Stick-slip motion, que es una compleja interacción entre las paredes del silo y el flujo del material granular a través de

el [3], provocando la resonancia del silo, generando un conjunto de contribuciones acústicas que se encuentran dentro de las frecuencias audibles para los seres humanos y algunos otros seres vivos. Estas perturbaciones, pueden generar daños fisiológicos y psicológicos, por lo cual es de interés encontrar una metodología de diseño de silos basada en la eliminación de ruido. Lo cual traería beneficios para evitar los daños a las estructuras de soporte de las instalaciones de estos dispositivos. Los patrones de radiación presentados dan la pauta para estudios futuros sobre el tratamiento del ruido con el fin de dirigirlo a zonas específicas donde sus efectos sean mínimos. Hay que mencionar, que si bien la generación de ondas acústicas en la descarga del silo se explica con el mecanismo Stick-slip motion, no es una teoría completa. Ya que de los experimentos realizados en [16] y en el presente trabajo; en los resultados presentados se identifica que las contribuciones acústicas dependen de diferentes fac-

tores. Algunos de estos factores son las características físicas del material granular y del silo, así como el efecto que tiene la temperatura y la humedad. La interacción de todos estos factores enriquecen las contribuciones acústicas que generan sobretonos que no necesariamente son frecuencias armónicas de la frecuencia fundamental del fenómeno. Lo que hace más complejo el análisis. El tema de estudio de los sobretonos y el direccionamiento del ruido durante la descarga de un silo será tema de estudio en trabajos futuros.

Agradecimientos

JRHJ agradece al equipo del Laboratorio de Termofluidos de la Maestría en Ciencias en Termofluidos de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Azcapotzalco del IPN por proporcionar todos los medios para la realización de los experimentos reportados en este documento.

-
1. K. M. Benson, F. Q. Shandon, Sankaran Sundaresan, K. Kesava Rao, Silo music and silo quake: Granular flow-induced vibration, *Powder Technology*, **145** (2004) 190-202.
 2. L. Cohen, *Time-frequency analysis: Theory and applications*, (Prentice Hall, 1995).
 3. P. G. de Gennes, Propagation of pressure step in a granular material: The role of the wall friction, *Physical Review*. **55** (1997) 5759-5773.
 4. K. Kesava, Silo music: Sound emission during the flow of granular materials through tubes, *ScienceDirect: Powder Technology*. **167** (2006) 55-71.
 5. E. Kinsler, *Fundamentals of acoustics*, 3rd. Ed, (United States of America: John Wiley and Sons, 1973).
 6. Mukesh L. Dhoriyani, Kranthi Kumar Jonnalagadda, R. K. Kandikatla, K. Kesava Rao, Silo music: Sound emission during the flow of granular materials through tubes, *Powder technology*, 167 (2006) 55-71.
 7. M. Niedostatkiwicz, J. Tejchman, Experimental and theoretical studies on resonance dynamic effects during silo flow, *Powder Handl. Proc.* **15** (2003) 36.
 8. A. Petculescu, J. Riner, *J. Acoust. Soc. Am.* **128** (2010) 1575.
 9. T. D. Rossing, *Springer Handbook of Acoustics*, (Springer, USA C.A., 2014).
 10. D. Schulze, *Powders and Bulk Solids*, (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008).
 11. K. Wilde, J. Tejchman, M. Rucka, M. Niedostatkiwicz, Experimental and theoretical investigations of silo music, *Powder Technology*, **198** (2010) 38-48.
 12. K. Wilde, M. Rucka, J. Tejchman, Silo music: Mechanism of dynamic flow and structure interaction, *Powder Technology*, **186** (2008) 113-129.
 13. B. Andreotti, *Granular media: Between fluid and solid*, (Cambridge University press, 2013).
 14. K. Edward, *Fundamentals of signals and systems*, (Pearson; 3 edition, July 21, 2006).
 15. A. V. Oppenheim, *Signals and systems*, (Pearson, 2 edition, August, 1996).
 16. J. Hernández-Juárez, V. S. Álvarez Salazar, A. López-Villa, D. A. Serrano, A. Medina, *Generación de ondas acústicas debido a la descarga de diferentes medios granulares en un silo inclinado*, Memorias del XXIII Congreso Internacional Anual de la SOMIM de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, Año 3, Núm. 1, Septiembre 2017, Ciudad de México. ISSN: 2448-5551.
 17. A. Medina, D. A. Serrano, G. J. Gutierrez, On the mass flow silos with lateral exit holes, *Rev. Mex. Fis.* **59** (2013) 287-291. July-August 2013.
 18. S. M. Wentworth, *Fundamentals of electromagnetics with engineering applications*; 1st. Ed., United States of America: (John Wiley and Sons, 2005).