

## ANÁLISIS DE FACTORES DE RIESGO DE INCENDIOS Y CONATOS POR POLVO COMBUSTIBLE EN UNA PLANTA DE ALIMENTOS PARA CAMARÓN EN ECUADOR

### ANALYSIS OF RISK FACTORS OF FIRES AND ATTEMPTS DUE TO COMBUSTIBLE DUST IN A SHRIMP FEED PLANT IN ECUADOR

Dick Aguilar-Arana<sup>1</sup>, Kenny Escobar-Segovia<sup>2</sup>

#### Palabras clave:

Alimentos balanceados, Fuentes de ignición, Polvo combustible, Riesgo de incendios, Seguridad industrial

#### Resumen

Los incendios por polvo combustible son un riesgo relevante en la industria de alimentos balanceados, especialmente en la molienda, donde coinciden material fino, fricción y fuentes de ignición. En Ecuador, la ausencia de normativa específica resalta la necesidad de evidencia técnica para fortalecer la prevención. El estudio analizó los factores de riesgo en una planta de alimentos para camarón, con base en la NFPA 660 (2025). Se aplicó un enfoque cualitativo, con lista de verificación en cuatro categorías: acumulación de polvo, ventilación y confinamiento, fuentes de ignición y mantenimiento, complementada con revisión de SDS y observación en tres turnos. Los resultados evidenciaron un 10% de desviaciones, principalmente en fuentes de ignición (14,3%) y acumulación de polvo (18,2%). El equipo Hammer Mill presentó mayores hallazgos por eventos de chispa, mientras que el Dust Collector tenía protecciones contra explosión no habilitadas. El Pulverizer cumplió totalmente. Se concluye que existen controles adecuados en ventilación y mantenimiento, pero se requiere mejorar la habilitación de protecciones, la inspección crítica y el control en zonas de transferencia. Estos resultados sirven como línea base para futuras evaluaciones.

**Códigos JEL:** J28, K32

#### Keywords:

Feed manufacturing, Ignition sources, Combustible dust, Fire risk, Industrial safety

#### Abstract

Fires caused by combustible dust represent a significant risk in the feed manufacturing industry, particularly during grinding processes, where fine material accumulation, mechanical friction, and potential ignition sources converge. In Ecuador, the absence of specific regulations highlights the need for local technical evidence to strengthen prevention and safety management. This study analyzed fire and near-miss risk factors in the grinding area of a shrimp feed plant, aligned with NFPA 660 (2025). A qualitative, non-

<sup>1</sup> Universidad Espíritu Santo, Facultad de Postgrados, Km. 2,5 Vía Samborondón (Ecuador).

E-mail: [dick.aguilar@uees.edu.ec](mailto:dick.aguilar@uees.edu.ec) ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1472-0526>

<sup>2</sup> Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Km. 30,5 Vía Perimetral (Ecuador).

E-mail: [kescobar@espol.edu.ec](mailto:kescobar@espol.edu.ec) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1278-7640>

experimental approach was applied using a structured checklist across four control categories: dust accumulation, ventilation and confinement, ignition sources, and housekeeping/maintenance, complemented by SDS review and observations across three operational shifts. Results showed a 10% deviation rate, mainly related to ignition sources (14.3%) and dust accumulation (18.2%). The Hammer Mill presented the highest number of findings due to recent spark events, while the Dust Collector had explosion protection systems installed but not yet operational. The Pulverizer demonstrated full compliance. It is concluded that the plant maintains adequate controls in ventilation and maintenance; however, improvements are needed in activating protection systems, enhancing critical inspections, and controlling transfer points. These findings provide a baseline for future operational assessments.

## INTRODUCCIÓN

Los incendios ocasionados por polvos combustibles representan uno de los riesgos más críticos en la seguridad industrial moderna. Su presencia en distintas industrias —especialmente en aquellas que procesan alimentos, granos o productos químicos— ha sido documentada en múltiples investigaciones y reportes técnicos a nivel mundial. Organismos como la Occupational Safety and Health Administration (OSHA, 2015) y la National Fire Protection Association (NFPA, 2017) han insistido en la necesidad de controlar factores determinantes como la ventilación, la eliminación de fuentes de ignición y el uso de sistemas de supresión, con el fin de prevenir explosiones o deflagraciones que puedan poner en riesgo la vida de los trabajadores y la continuidad de las operaciones.

A nivel internacional, se han reportado accidentes graves asociados a polvo combustible que han causado pérdidas humanas y materiales significativas. Casos como las explosiones ocurridas en Imperial Sugar Company (2008) y otros eventos industriales analizados por el U.S. Chemical Safety Board (U.S. Chemical Safety Board [CSB], s.f.) evidencian la gravedad del riesgo asociado al polvo combustible y no gestionar adecuadamente la acumulación de polvo en entornos confinados. Estas tragedias impulsaron el desarrollo de normativas más estrictas, guías técnicas y programas de inspección, orientados a identificar los factores que desencadenan estos eventos y a establecer

sistemas de control más robustos (Amyotte, 2014; Eckhoff, 2003).

En este sentido, la experiencia internacional demuestra que el polvo combustible no debe ser tratado como un residuo común, sino como un agente de riesgo con características físicas y químicas que requieren una gestión diferenciada.

Dentro del contexto de explosiones de polvos y su distinción entre deflagración y detonación, es importante destacar algunas definiciones y parámetros. La deflagración se refiere a una combustión rápida en la cual la velocidad de propagación de la llama es menor que la del sonido, y la propagación ocurre principalmente por la transferencia de calor y difusión de masa en el medio reactivo. Esto contrasta con la detonación, caracterizada por una onda de choque que viaja a velocidades superiores a las del sonido y genera presiones mucho más elevadas (Foust, 2022).

Las detonaciones, que pueden ocurrir tanto en espacios abiertos como cerrados, están asociadas a materiales altamente reactivos y explosivos. La transición de deflagración a detonación (DDT) es un fenómeno crítico que puede ocurrir bajo ciertas condiciones de confinamiento y presencia de obstáculos (Li, & Xiao, 2023).

La investigación sobre esta transición sugiere que la geometría de los canales, la dispersión de la mezcla reactiva y la presencia de obstáculos pueden influir significativamente en la transición

a una detonación (Teodorczyk et al., 1989; Ciccarelli et al., 2005).

En el caso particular del Ecuador, la normativa vigente no aborda de manera específica el riesgo asociado a polvos combustibles (Gómez-García et al., 2017). Esta ausencia regulatoria deja un vacío que se refleja en las prácticas de seguridad industrial de muchas empresas, limitando la implementación de programas preventivos basados en estándares internacionales. La mayoría de las industrias ecuatorianas aplica controles generales contra incendios —como extintores, alarmas y brigadas—, pero no existen protocolos que contemplen la identificación de materiales combustibles en forma de polvo, la medición de concentraciones en el aire o la limpieza técnica de superficies elevadas. Esta brecha evidencia una oportunidad para fortalecer la cultura preventiva mediante la adopción de buenas prácticas adaptadas al contexto nacional.

Dentro de este panorama, la industria de alimentos para camarón tiene una relevancia especial. Ecuador es uno de los principales exportadores de camarón a nivel mundial, y su cadena productiva depende en gran medida de plantas de alimentos balanceados que operan con altos volúmenes de materias primas orgánicas pulverizadas. Estas condiciones, sumadas al uso intensivo de equipos como molinos de martillos, mezcladoras, elevadores mecánicos y sistemas de transporte neumático, incrementan el potencial de ignición si no se implementan controles adecuados (Štroch, 2015).

Los conatos registrados en diversas empresas de plantas de alimentos para camarón, por polvo combustible, demuestran la vulnerabilidad de este tipo de instalaciones y la necesidad urgente de generar conocimiento técnico local que permita prevenir eventos de mayor gravedad (Joseph, 2006; Ribeiro, 2025).

La revisión de la literatura científica y de casos emblemáticos confirma que la combinación de polvo combustible, oxígeno, fuentes de ignición, confinamiento y dispersión —conocida como el Pentágono de Explosión— constituye la base de la mayoría de los incidentes industriales

relacionados con polvo (Amyotte & Eckhoff, 2010; Eckhoff, 2003). Cuando alguno de estos elementos no es controlado, el riesgo se incrementa exponencialmente. Adicionalmente, la falta de mantenimiento preventivo, la acumulación de polvo en zonas críticas, el mal estado de los sistemas eléctricos y la ausencia de monitoreo ambiental son factores que agravan la probabilidad de incendio o deflagración (OSHA, 2015; NFPA, 2017).

Pese a estas evidencias, en muchas plantas locales los programas de mantenimiento, limpieza y ventilación se realizan de manera reactiva, sin una planificación preventiva basada en el análisis de factores de riesgo. A esto se suma que la mayoría de los trabajadores desconoce el comportamiento del polvo combustible y sus condiciones de ignición, lo que limita la capacidad de respuesta ante un evento. Esta situación resalta la importancia de integrar la percepción del trabajador dentro del diagnóstico de seguridad, ya que su experiencia directa en la operación permite identificar señales de advertencia tempranas que a menudo no son registradas formalmente.

Por ello, el presente estudio no pretende aplicar una metodología de certificación como la establecida en la Directiva ATEX o la NFPA 660, dado que su alcance no consiste en clasificar zonas ni definir diseños de ingeniería. Más bien, busca identificar y analizar los factores de riesgo presentes en el entorno operativo de una planta de alimentos para camarón en Ecuador, contrastándolos con criterios técnicos y normativos internacionales para generar propuestas de mejora preventiva. Este enfoque permitirá comprender el fenómeno desde la realidad local, utilizando un método mixto de tipo descriptivo y no experimental, basado en observación directa, revisión documental, entrevistas al personal operativo y mediciones ambientales.

En este sentido, la investigación busca responder tres preguntas fundamentales: ¿qué factores están asociados a la ocurrencia de incendios y conatos por polvo combustible?, ¿cómo se manifiestan dichos factores dentro del proceso productivo?, y ¿para qué resulta relevante

comprenderlos en el contexto de la seguridad industrial ecuatoriana? Las respuestas a estas preguntas permitirán generar evidencia útil para reforzar los programas de prevención y sensibilizar a las organizaciones sobre la importancia de una gestión proactiva del riesgo.

Finalmente, el objetivo general del presente estudio es analizar los factores de riesgo de incendios y conatos por polvo combustible en una planta de alimentos para camarón en Ecuador, para la identificación de condiciones críticas, evaluando la relación con las prácticas de mantenimiento, limpieza y capacitación, proponiendo acciones de mejora que fortalezcan la gestión preventiva dentro de la industria local.

## METODOLOGÍA

Este estudio se desarrolló con un enfoque cualitativo, de alcance descriptivo y analítico. Su propósito fue comprender las condiciones que favorecen la presencia de riesgos asociados a incendios por polvo combustible en el área de molienda, identificando factores que puedan controlarse para mejorar la seguridad del proceso. En lugar de aplicar modelos numéricos o cálculos avanzados, el análisis se centró en observar la realidad operacional, interpretarla y proponer acciones preventivas aplicables al entorno evaluado.

### Tipo de investigación

El estudio adopta un enfoque cualitativo, ya que busca interpretar las condiciones presentes en el área de molienda y comprender cómo estas se relacionan con el riesgo de incendios por polvo combustible. El enfoque es descriptivo y analítico porque permite caracterizar el fenómeno y profundizar en sus causas sin recurrir a procedimientos estadísticos complejos.

### Diseño de la investigación

El diseño es no experimental, transversal y de campo. Es no experimental porque no se manipulan variables del proceso; es transversal porque la información se recolecta en un solo momento del tiempo; y es de campo porque los datos se obtienen directamente en el lugar donde

ocurre el fenómeno. Esta estructura permite describir condiciones reales y compararlas con criterios técnicos de referencia.

### Enfoque de la investigación

El enfoque cualitativo aplicado facilita integrar distintas fuentes de información y analizarlas dentro del contexto real de la operación. Para este estudio se consideraron tres insumos principales: (a) revisión documental de hojas de seguridad (SDS) y literatura técnica, (b) una lista de verificación basada en la NFPA 660 (2025) y (c) observación estructurada del área de molienda. Este conjunto de técnicas permite analizar el fenómeno sin depender de instrumentos estadísticos especializados.

### Área y población de estudio

El estudio se desarrolló en el área de molienda de una planta de alimentos para camarón ubicada en Ecuador, donde operan equipos como hammer mills, pulverizer y dust collector. Estas máquinas generan partículas finas con características combustibles, lo cual incrementa el riesgo de incendio. La literatura especializada señala que la molienda es una de las etapas más vulnerables debido a la combinación de fricción, acumulación y posibles fuentes de ignición (Eckhoff, 2003; Amyotte, 2014). La NFPA 660 (2025) establece que los procesos que manipulan sólidos particulados requieren controles específicos para evitar condiciones que puedan favorecer una deflagración. Además, la elección del área responde a conatos registrados en 2022 y 2023. Este tipo de eventos se explica mediante el pentágono de explosión, el cual describe cinco elementos necesarios para la deflagración: polvo combustible, oxígeno, fuente de ignición, dispersión y confinamiento. Tanto OSHA (2015) como la NFPA 660 (2025) coinciden en que el control de estos factores debe ser una prioridad en plantas con presencia de polvo combustible.

### Procedimiento

El procedimiento se desarrolló en cinco etapas: (1) revisión documental de SDS, antecedentes e información técnica relevante; (2) análisis de checklist basado en cuatro categorías

de la NFPA 660 (2025): acumulación de polvo, ventilación y confinamiento, fuentes de ignición, y housekeeping/mantenimiento; (3) observación estructurada en campo, aplicando el checklist en los tres turnos del proceso; (4) organización de los hallazgos mediante matrices; y (5) interpretación de los resultados para orientar acciones preventivas.

### Técnicas e instrumentos

Primero se revisaron las Hojas de Seguridad (SDS) de las materias primas utilizadas en el proceso de molienda para confirmar que, por su composición y características físicas, generan polvo combustible. Una vez validado este punto, se aplicó una lista de verificación estructurada con opciones X (cumple), → (no cumple) y NA, y se complementó con observación directa en planta. Esto permitió evaluar prácticas operativas, condiciones del equipo y controles existentes en comparación con los requerimientos indicados en NFPA 660 (2025), registrando observaciones breves cuando fue necesario.

### Análisis de la información

El análisis se realizó en dos niveles. En el primer nivel, se efectuó un análisis narrativo, describiendo los hallazgos por categoría. En el segundo nivel, se elaboró una matriz porcentual para identificar tendencias y priorizar acciones. El porcentaje de hallazgos se calculó mediante la fórmula:

$$\text{Hallazgos (\%)} = (\text{ítems con hallazgos}) / (\text{ítems evaluados}) \times 100\%$$

Este procedimiento permitió identificar condiciones críticas sin recurrir a métodos estadísticos avanzados, facilitando la interpretación y la toma de decisiones.

## RESULTADOS

La evaluación se realizó en el área de molienda de la planta, enfocada en tres equipos principales utilizados en el procesamiento de alimento para camarón: Hammer Mill, Dust Collector y Pulverizer. Se obtuvieron 70 observaciones válidas durante la jornada de operación, constituyendo una muestra representativa del comportamiento real del sistema bajo condiciones normales.

En términos generales, se identificaron 7 desviaciones frente a los criterios establecidos, lo que corresponde a un 10% de hallazgos. Este valor se toma como referencia inicial para el seguimiento y mejora continua de los controles orientados a la prevención de incendios y explosiones por polvo combustible.

Las observaciones se agruparon según las categorías definidas por la NFPA 660, lo cual permitió analizar el desempeño por tipo de riesgo y por equipo.

### Resultados por categoría de riesgo

La Tabla 1 presenta los resultados agrupados por categoría de control. Las desviaciones se concentraron principalmente en los aspectos relacionados con acumulación de polvo y fuentes de ignición, áreas consideradas críticas en procesos de molienda.

**TABLA 1**

Resultados por categoría (n = 70)

Categoría	Evaluaciones (n)	Hallazgos (h)	%
A. Generación y acumulación de polvo	11	2	18.2
B. Ventilación y confinamiento	15	0	0.00
C. Fuentes de ignición	28	4	14.3
D. Housekeeping y mantenimiento	16	1	6.3
Total	70	7	10.0

Nota. Las categorías se basan en los criterios establecidos por NFPA 660 (2025).

Los hallazgos se concentraron principalmente en dos áreas críticas definidas por NFPA 660:

- Generación y acumulación de polvo (A): 2 desviaciones sobre 11 verificaciones (18,2%). Las observaciones se relacionaron con acumulación puntual de material en zonas de transferencia y superficies elevadas, indicando la necesidad de mejorar el sellado en ciertos puntos y reforzar las rutinas de limpieza en áreas de caída de producto.

- Fuentes de ignición (C): 4 desviaciones sobre 28 verificaciones (14,3%).

Este grupo representó el mayor riesgo relativo, destacándose reportes recientes de detección de chispas en el Hammer Mill y la presencia de dispositivos de protección contra explosión instalados en el Dust Collector, pero aún no habilitados.

Las categorías de Ventilación/Confinamiento (B) y Housekeeping/Mantenimiento (D) mostraron un buen nivel de control, con 0% y 6,3% de desviaciones respectivamente, lo cual indica prácticas consistentes en estos aspectos.

### Resultados por equipo

La Tabla 2 resume los hallazgos por equipo inspeccionado.

**TABLA 2**  
Resultados por equipos (n = 70)

Equipo	Evaluaciones (n)	Hallazgos (h)	%
Hammer Mill	22	4	18.2
Dust Collector	25	3	12.0
Pulverizer	23	0	0.0

Nota. Las verificaciones cubrieron equipos primarios de la etapa de molienda para alimento acuícola.

El análisis por equipos mostró diferencias relevantes:

- Hammer Mill: 4 hallazgos de 22 observaciones (18,2%)

Las desviaciones se relacionaron con eventos de chispa detectados en el panel de monitoreo y una frecuencia de chequeos OEM menor a la recomendada para equipos con riesgo de ignición.

- Dust Collector: 3 hallazgos de 25 observaciones (12%)

Aunque el desempeño general fue adecuado, se identificaron aspectos importantes en la gestión de explosiones, como venteos que descargan hacia el interior del edificio y sistemas de aislamiento que aún no están habilitados.

- Pulverizer: Sin hallazgos en 23 observaciones (0%)

Este equipo presentó cumplimiento total durante la inspección, mostrando una operación estable y controles bien implementados.

Los resultados obtenidos reflejan un nivel general de control adecuado en la gestión del riesgo asociado a polvo combustible en el área de molienda. La mayor parte de los criterios evaluados se encuentra en cumplimiento, lo que coincide con prácticas operativas consolidadas en plantas con madurez en sistemas de gestión industrial. No obstante, los hallazgos observados permiten identificar áreas críticas que requieren intervención inmediata.

En primer lugar, la categoría fuentes de ignición presentó el porcentaje más alto de desviaciones. Este comportamiento es consistente con literatura técnica (Amyotte & Eckhoff, 2010) que señala que los sistemas rotativos y componentes mecánicos energizados, como los presentes en el Hammer Mill, son puntos recurrentes de iniciación de eventos térmicos o de chispa. La detección de alertas en el panel del sistema de supresión no debe interpretarse como un evento aislado, sino como una señal preventiva que exige un análisis causal y acciones de mejora.

En segundo lugar, la gestión de protección contra explosiones en el Dust Collector mostró dispositivos instalados, pero aún no habilitados, así como venteos que descargan al interior del edificio. De acuerdo con la NFPA 660 (2025), los sistemas de aislamiento y venteo deben ser funcionales para considerar el riesgo mitigado. Este aspecto representa una brecha que requiere acciones inmediatas, pues los colectores conectados a equipos de molienda son puntos típicos de iniciación de deflagración en

instalaciones de alimentos balanceados (Dust Safety Science, 2019).

Por otro lado, la categoría de ventilación y confinamiento obtuvo un cumplimiento del 100%. Esto indica que la planta mantiene una operación técnica adecuada en sellado de ductos, integridad de bolsas filtrantes,  $\Delta P$  dentro de parámetros y operación correcta de limpieza por pulsos. Este desempeño coincide con buenas prácticas industriales donde el mantenimiento preventivo y predictivo está institucionalizado (Arroyo Vaca & Obando Quito, 2022).

Finalmente, es relevante destacar que el Pulverizer no presentó desviaciones, indicando un nivel de estabilidad operativa y controles bien instaurados en esa línea. Este resultado puede servir como referencia interna para estandarizar prácticas hacia las otras máquinas evaluadas.

## CONCLUSIONES

La planta presenta una línea base de desviación del 10%, lo cual evidencia un nivel adecuado de cumplimiento en controles operativos, pero con oportunidades claras de mejora. Los hallazgos se concentran principalmente en fuentes de ignición (14,3%) y acumulación de polvo (18,2%), en concordancia con lo reportado en literatura especializada sobre procesos de molienda de alimentos.

El Hammer Mill y el Dust Collector son los equipos que requieren mayor atención debido a eventos de chispa registrados y la falta de habilitación de sistemas de aislamiento y venteo a ambiente seguro.

La evidencia sugiere que el sistema de ventilación y mantenimiento es sólido; sin embargo, se requiere reforzar prácticas específicas relacionadas a inspección crítica, habilitación de protecciones y control en zonas de transferencia de material.

El estudio proporciona una línea de referencia cuantitativa y cualitativa para medir avances en los próximos ciclos de auditoría y operación.

Una fortaleza importante de este estudio fue la posibilidad de observar de manera directa el comportamiento operativo de los equipos bajo condiciones reales, lo que permitió detectar situaciones que no suelen ser visibles únicamente mediante la revisión documental o de registros.

Además, el levantamiento se realizó en los tres turnos de trabajo, lo que ofreció una mirada amplia sobre la operación diaria. Sin embargo, el periodo de observación no superó los cinco días laborales, lo cual constituye una limitación, ya que ciertos patrones de acumulación de polvo, degradación de componentes o variaciones en prácticas de limpieza pueden requerir un seguimiento más prolongado para ser identificados con mayor precisión.

Asimismo, el estudio se concentró en una única planta, lo que restringe la posibilidad de extrapolar los resultados a otras instalaciones sin considerar sus propias características técnicas, niveles de automatización y rutinas de mantenimiento.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Espíritu Santo, por la ayuda en la elaboración de este artículo

**Financiación:** No hubo financiamiento para el estudio.

**Contribuciones** de los autores: DA-A: Concepción y diseño, adquisición de datos, análisis e interpretación, redacción y revisión; KE-S: análisis e interpretación, redacción y revisión

**Conflicto de intereses:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés

## REFERENCIAS

Amyotte, P. R., & Eckhoff, R. K. (2010). Dust explosion causation, prevention and mitigation: An overview. *Journal of Chemical Health and Safety*, 17(1), 15–28. <https://doi.org/10.1016/j.jchas.2009.05.002>

Arroyo Vaca, C. S., & Obando Quito, R. F. (2022). Importancia de la implementación de mantenimiento preventivo en las plantas de producción para optimizar procesos. *E-IDEA Journal of Engineering Science*, 4(10), 59-69. <https://doi.org/10.53734/esci.vol4.id240>

ATEX Center. (s.f.). Understanding and preventing dust explosions: Causes, risks, and safety measures. <https://atex.center/understanding-and-preventing-dust-explosions-causes-risks-and-safety-measures/>

Cicarelli, G., & Dorofeev, S. B. (2005). Flame acceleration and transition to detonation in ducts. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(4), 499–550. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.12.002>

Dust Safety Science. (2019). 2018 Combustible Dust Incident Report (Version 1.1). <https://dustsafetyscience.com/wp-content/uploads/2019/03/2018-Combustible-Dust-Incident-Report-Version-1-1.pdf>

Eckhoff, R. K. (2003). Dust explosions in the process industries: Identification, assessment and control of dust hazards.

Foust, J. (2022). Understanding and preventing dust explosions: Causes, risks, and safety measures. <https://atex.center/understanding-and-preventing-dust-explosions-causes-risks-and-safety-measures/>

Gómez-García, A., Merino-Salazar, P., Vasco, P., & Calderón, D. (2017). Occupational Safety and Health in Ecuador. *INNOVA Research Journal*, 2, 139–152. <https://doi.org/10.33890/innova.v2.n12.2017.322>

Joseph, G. (2006). Combustible dusts: A serious industrial hazard. *Journal Of Hazardous Materials*, 142(3), 589-591. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.06.127>

Li, M., & Xiao, H. (2023). A study of the occurrence of DDT in an array of obstacles: Combined effects of longitudinal and transverse obstacle spacings. *Fuel*, 357, 129813. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129813>

National Fire Protection Association. (2017). NFPA 68: Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting. NFPA.

National Fire Protection Association. (2025). NFPA 660: Standard for combustible dust and particulate solid. NFPA.

Occupational Safety and Health Administration. (2016). Combustible Dust: An Explosion Hazard. <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/OSHA3878.pdf>

Ribeiro, L. R., Constantino, H. R., De Moura, L. S., Lau, L. J., & Morcelli, A. V. (2025). Dust explosion hazards in animal feed production in Brazil: A process safety review. *Process Safety Progress*, 44(4), 730-735. <https://doi.org/10.1002/prs.70006>

Štroch, P. (2015). Do not underestimate danger of explosion; Even dust can destroy equipment and kill. *Perspectives In Science*, 7, 312-316. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2015.11.048>

Teodorczyk, A., Lee, J. H. S., & Knystautas, R. (1989). Detonation in fuel-air mixtures. *Combustion and Flame*, 76(2), 165–179. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(89\)90061-7](https://doi.org/10.1016/0010-2180(89)90061-7)

U.S. Chemical Safety Board. (s.f.). Combustible dust hazard investigation. <https://www.csb.gov/investigations/completed-investigations/?Type=2>