

**ANALISIS DE RIESGOS DE EXPLOSION DE COMBUSTIBLES
PULVERIZADOS MEDIANTE ANALISIS DE CAPAS DE PROTECCION (LOPA)**

SILVIA LILIANA MARTINEZ CORREA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2007

**ANALISIS DE RIESGOS DE EXPLOSION DE COMBUSTIBLES
PULVERIZADOS MEDIANTE ANALISIS DE CAPAS DE PROTECCION (LOPA)**

SILVIA LILIANA MARTINEZ CORREA

**Trabajo de grado para optar al titulo de
Ingeniera Química**

Director

Ph.D M. SAM MANNAN, PE,CSP

Lector: Ph.D ALVARO RAMIREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2007

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Álvaro Ramírez García, Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, por brindarme la oportunidad de vivir una extraordinaria experiencia de crecimiento intelectual y personal.

Al Dr Sam Mannan, Director del Centro de Investigación MKOPSC, por permitirme formar parte de su grupo de Investigación, y por brindarme el aprendizaje de una experiencia invaluable.

Al Dr William J Rogers, Investigador asociado al MKOPSC, por su apoyo y su gran ayuda en la realización de este trabajo.

Al Dr Kenneth Hall, Director del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Texas A&M por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo.

A todos los miembros del MKOPSC, por su gran confianza y apoyo, y por toda la colaboración brindada durante la realización de este trabajo.

A Dios por colmar mi vida de bendiciones

A mi madre por ser el ángel que me cuida desde el cielo

A mi Padre por su amor y apoyo

*A mis hermanas Mechas y Caya por su confianza en mi y por impulsarme a seguir
mis sueños*

A mi Tía Mercedes por su incondicional apoyo y confianza

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	11
1. CONCEPTOS TEORICOS	3
1.1. EXPLOSIONES DE MATERIAL PULVERIZADO	3
1.2 CARACTERISTICAS EXPLOSIVAS DE LOS COMBUSTIBLES PULVERIZADOS	4
1.3 COMBUSTIBLES PULVERIZADOS Y TAMANO DE PARTICULA	5
1.4 ESTANDARES DE LA NFPA QUE REGULAN LAS EXPLOSIONES DE MATERIAL PULVERIZADO	5
1.5 ANALISIS DE CAPAS DE PROTECCION (LOPA)	6
2. METODOLOGIA	7
2.1 IDENTIFICACION DE LOS RIESGOS DE PLANTAS QUE MANEJEN COMBUSTIBLES PULVERIZADOS	7
2.2 PROCEDIMIENTO PARA LA IDENTIFICACION DE RIESGOS RELACIONADOS CON COMBUSTIBLES PULVERIZADOS	8
2.3 METODOLOGIA UTILIZADA PARA LA EVALUACION DE RIESGO MEDIANTE LOPA	9
2.3.1 Identificación de escenarios con riesgos de explosiones provocadas por material pulverizado	9
2.3.2 Identificación de Capas de Protección	10
2.3.3 Estimación de la Frecuencia de los Escenarios	11
2.3.4 Categorización de las frecuencias de los escenarios	15
2.3.5 Estimación de las consecuencias de los escenarios	15
2.3.6 Categorización de las consecuencias de los escenarios	18
2.3.7 Evaluación de riesgo de los escenarios	18
3. IMPLEMENTACION DE LA METODOLOGIA Y RESULTADOS	20

3.1 PREVENCIÓN DE RIESGOS DE EXPLOSIÓN EN PLANTAS QUE MANEJAN MATERIALES PULVERIZADOS	20
3.2. RIESGOS INDUSTRIALES RELACIONADOS CON COMBUSTIBLES PULVERIZADOS	22
3.2.1. Características del Combustible Pulverizado	22
3.2.2. Operaciones de Proceso Riesgosas	23
3.2.3. Riesgos en Planta	23
3.2.5. Riesgos en Operaciones de Mantenimiento	24
3.2.6. Riesgos Inducidos por elementos Humanos	24
3.3. DESARROLLO DE CAPAS DE PROTECCIÓN PARA PROTECCIÓN CONTRA EXPLOSIONES DE MATERIAL PULVERIZADO	25
3.3.1. Capas de protección sobre la atmósfera explosiva (B1)	26
3.3.2. Capas de protección sobre las fuentes de ignición (B2)	26
3.3.3. Capas de protección sobre los puntos de operación del proceso (B3)	27
3.3.4. Capas de protección y mitigación (B4/B5)	27
3.4. FRECUENCIAS DE LOS ESCENARIOS	27
3.5. CONSECUENCIAS DE LOS ESCENARIOS	28
3.6. MATRIZ DE RIESGO PARA LOS ESCENARIOS	29
CONCLUSIONES	33
RECOMENDACIONES	35
BIBLIOGRAFIA	37
ANEXOS	38

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Pentágono de explosiones de material pulverizado	3
Figura 2. Cuadro de Identificación de Riesgos relacionados con Combustibles Pulverizados	8
Figura 3. Metodología utilizada para la evaluación de riesgo mediante LOPA	9
Figura 4: Esquema de las capas de protección contra fuegos o explosiones de material pulverizado	25

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Escenarios analizados para la aplicación de LOPA	10
Tabla 2. Clasificación de atmósferas explosivas	12
Tabla 3. Cuadro de categorización de las fuentes de ignición	13
Tabla 4. Frecuencia de ignición según el tipo de material pulverizado	14
Tabla 5. Escenarios para cálculo de frecuencias en silicona	14
Tabla 6. Caracterización de las frecuencias de los escenarios	15
Tabla 7. Descripción de daños ocasionados por explosiones	17
Tabla 8. Categorización de las consecuencias de los escenarios	18
Tabla 9. Matriz de evaluación de riesgos	19
Tabla 10. Operaciones de proceso riesgosas	23
Tabla 11. Riesgos en planta	23
Tabla 12. Riesgos ambientales	24
Tabla 13. Riesgos en operaciones de mantenimiento	24
Tabla 14. Riesgos inducidos por elementos humanos	24
Tabla 15. Capas de protección sobre la atmósfera explosiva	26
Tabla 16. Capas de protección sobre las fuentes de ignición	26
Tabla 17. Capas de protección sobre los puntos de operación del proceso	27
Tabla 18. Capas de protección y mitigación	27
Tabla 19. Resultados de las frecuencias de los escenarios	27
Tabla 20. Consecuencias para explosión de silicona pulverizada	29
Tabla 21. Frecuencias y consecuencias de los escenarios evaluados	29
Tabla 22. Matriz de riesgos para los escenarios analizados	30
Tabla 23. Frecuencia de los escenarios mitigados	31
Tabla 24. Matriz de riesgos para los eventos mitigados	32

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Historia de los incidentes relacionados con explosiones de material pulverizado	38
ANEXO B: Estadísticas de las explosiones en los últimos 25 años en estados unidos	42

RESUMEN

TITULO: "ANÁLISIS DE RIESGOS DE EXPLOSION DE COMBUSTIBLES PULVERIZADOS MEDIANTE ANÁLISIS DE CAPAS DE PROTECCION (LOPA)"¹

AUTOR: MARTINEZ CORRE, Silvia Liliana**

PALABRAS CLAVE: LOPA, Combustibles Pulverizados, Explosiones de Combustibles Pulverizados.

DESCRIPCION:

Las explosiones relacionadas con Combustibles Pulverizados representan un serio riesgo para las plantas industriales, ya que accidentes relacionados con este tipo de materiales han provocado la muerte y/o heridas a trabajadores, y han ocasionado la destrucción de plantas industriales; en Estados Unidos, país donde se realizó este trabajo, la creciente frecuencia y severidad de estos accidentes ha creado una atmósfera de preocupación en torno a ellos. Es por esta razón que estudios orientados a la prevención de este tipo de accidentes se hacen necesarios.

En el presente trabajo se realiza una revisión de varios reportes de accidentes con el fin de determinar las fallas más comunes y más importantes que se cometen en las plantas industriales y que conllevan a la secuencia de eventos que termina en fuegos o explosiones de combustibles pulverizados. Adicionalmente se realizó una evaluación de riesgo mediante el método de Análisis de Capas de Protección (LOPA), que es una herramienta de análisis de riesgo que consiste en aplicar capas de protección independientes (IPLs) que funcionen como barreras de protección ante la presencia de un evento indeseado. Esta herramienta permite cuantificar el riesgo de determinado evento indeseado y determinar medidas de prevención en caso de ser requeridas.

¹ Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Química. Director: M. Sam Mannan, PhD.

ABSTRACT

TITLE: “RISK ANALYSIS OF DUST EXPLOSIONS BY MEANS OF LAYER OF PROTECTION ANALYSIS (LOPA)”*

AUTOR: MARTINEZ CORREA, Silvia Liliana**

KEY WORDS: LOPA, Dust, Dust Explosions

DESCRIPTION:

Dust explosions represent a serious hazard in the process industries; they have resulted in the destruction of process plants and equipment, injury and death of workers, and loss of process. In the United States, country where this work was developed, the increasing frequency and severity of this kind of accidents have created an atmosphere of concern around Dust explosions. Is because of that reason that research studies oriented to prevent and mitigate this kind of accidents seems to be necessary.

In the present work, a review of some accident reports was carried out with the objective of knowing the most common and most important failures often committed in industrial plants that help to the sequence of events that ends up in dust fires and dust explosions. Additionally, a risk evaluation for specific scenarios that involves dust materials was carried out, this scenarios were chosen having in account the kind of combustible dust, kind of explosive atmosphere and ignition source, the risk analysis was carried out by means of the Layer of Protection Analysis (LOPA) methodology, which consist on applying Independent Layers of Protection (IPLs) that work as protection barriers against undesirable events.

Finally, based on the obtained results, recommendations about prevention and mitigation of dust explosions risk were develop.

* Graduation Project

** Physical –Chemical Engineering College, Chemical Engineering Department.
Director: M. Sam Mannan, PhD.

INTRODUCCION

Las explosiones relacionadas con ignición de materiales pulverizados representan un serio riesgo en las plantas industriales, incidentes de este tipo han resultado en la destrucción de plantas y equipos, y en heridas y/o muertes de trabajadores. La creciente frecuencia y severidad asociadas a explosiones de material pulverizado en los últimos años en los Estados Unidos, particularmente en 2003, año en el que se presentaron 3 grandes explosiones que dejaron como resultado 13 muertos, docenas de heridos y cuantiosas pérdidas materiales; han creado una atmósfera de preocupación en cuanto a la prevención y mitigación de estos incidentes. Es en este hecho donde se cimienta la motivación de este trabajo, que fue realizado en Mary Kay O'Connor Process Safety Center (MKOPSC), centro de investigación asociado al departamento de Ingeniería Química de Texas A&M University, y que tiene como objetivo la investigación concerniente a la seguridad industrial.

La metodología presentada en este trabajo, se divide en dos partes, la primera, concerniente a una revisión del estado actual de la normatividad encargada de la prevención y mitigación de explosiones de material pulverizado, así como la revisión de reportes de incidentes relacionados con este tipo de accidentes industriales, con el fin de determinar las fallas más comunes y más importantes que se cometen en las plantas, y que contribuyen con la secuencia de eventos que desembocan en accidentes de esta naturaleza. Con este estudio, se busca determinar planes de acción y pequeñas recomendaciones fáciles de implementar que determinen, los equipos más susceptibles a este riesgo y planteen medidas de prevención.

La segunda parte del trabajo corresponde a una evaluación de riesgo, para determinados escenarios, los cuales fueron establecidos teniendo en cuenta el

tipo de material pulverizado a estudiar y sus frecuencias de ignición. Dicha evaluación de riesgo se llevo a cabo, aplicando un método de análisis de riesgo llamado análisis de Capas de Protección (LOPA), esta metodología consiste en aplicar capas de protección independientes (IPL), que funcionen como barreras contra un riesgo determinado, en este caso una explosión de material pulverizado, además de esto, la metodología de LOPA permite realizar una evaluaciones de riesgos, por medio de la construcción de una matriz de riesgos, que enfrenta la frecuencia probable del incidente, y la consecuencia probable del mismo y categoriza su riesgo dependiendo de su posición en la matriz. En este trabajo se establecen las IPLs mas adecuadas para la prevención y mitigación de explosiones de material pulverizado, y posteriormente se realiza una evaluación de riesgo para algunos escenarios se determina su categorización de riesgo y procedimiento de mejoramiento para disminuir el riesgo en caso de ser necesario.

Finalmente, se realizan conclusiones a cerca de la efectividad de las metodologías empleadas, y se describen algunas recomendaciones útiles para disminuir el riesgo de explosiones relacionadas con materiales pulverizados.

1. CONCEPTOS TEORICOS

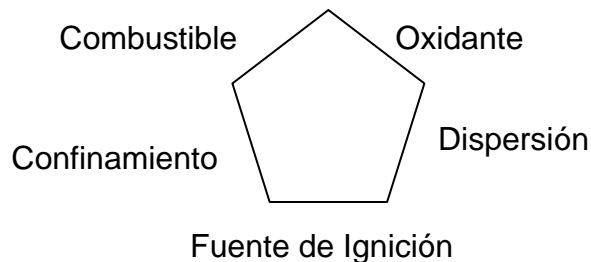
1.1. EXPLOSIONES DE MATERIAL PULVERIZADO

Una explosión de material pulverizado (dust explosión) es definida como cualquier explosión causada por cualquier material combustible sólido finamente dividido. Cualquier material sólido que pueda presentar combustión en presencia de aire, lo hará con una velocidad y violencia que aumenta con el incremento del grado de subdivisión del material.

Cuando el material combustible se encuentra subdividido en pequeños trozos, la velocidad de combustión aumenta por que la superficie de contacto entre el material combustible y el oxidante ha incrementado, si se continúa incrementando el grado de subdivisión del material hasta el nivel de pequeñas partículas del orden de micrones, y las partículas se encuentran suspendidas en suficiente cantidad de oxidante como para dar a cada partícula espacio para una combustión sin restricción, la velocidad de combustión puede ser muy alta, y la energía necesaria para la ignición puede ser muy pequeña.

En la figura 1 se muestran los cinco factores requeridos para formar el “pentágono de explosión”, para una explosión de material pulverizado estos son: combustible, oxidante, dispersión, confinamiento y fuente de ignición.

Figura 1. Pentágono de explosiones de material pulverizado



1.2 CARACTERISTICAS EXPLOSIVAS DE LOS COMBUSTIBLES PULVERIZADOS

Las características explosivas de los combustibles pulverizados pueden ser subdivididas en dos categorías, la primera hacer referencia a la probabilidad de ocurrencia de una explosión, estas características son:

- Mínima Concentración de Explosivo (MEC): Esta definida como la mínima concentración de material pulverizado en aire que pueda propagar una explosión.
- Mínima Energía de Ignición (MIE): Se refiere a la mínima energía que una fuente de ignición deba proveer para iniciar la ignición de una nube de material pulverizado.
- Concentración Limitante de Oxígeno (LOC): Es la mínima concentración de oxígeno que puede formar una nube combustible de material pulverizado.

La segunda categoría describe la seguridad de una explosión causada por material pulverizado cuando esta ocurre:

- Presión Máxima de explosión (Pmax): Es la máxima presión desarrollada en un recipiente cerrado durante una explosión, con el combustible pulverizado que se este probando.
- Rata Máxima de Aumento de Presión [(dP/dt)max]: Este termino esta definido como la rata máxima de aumento de presión con el tiempo en el recipiente cerrado en que se lleve a cabo la explosión.
- Índice de Deflagración (Kst) : Este termino es el volumen normalizado de la rata máxima de aumento de presión, y se obtiene mediante la ley cúbica:

$$K_{st} = (dP/dt)_{\max} * V^{1/3}$$

Los combustibles pulverizados se pueden clasificar por sus valores de Kst, en orden creciente de la violencia de la explosión.

$0 < K_{st} < 200$	Explosión clase 1
$200 < K_{st} < 300$	Explosión clase 2
$K_{st} > 300$	Explosión clase 3

1.3 COMBUSTIBLES PULVERIZADOS Y TAMANO DE PARTICULA

No todas las partículas pequeñas se queman en presencia de una fuente ignición y oxígeno, por que no todas son materiales combustibles. NFPA² define combustibles pulverizados como “cualquier material sólido finamente dividido, cuyo tamaño sea igual o menor a 420 micrones en diámetro y presente riesgos de fuego o explosión cuando se encuentre disperso en aire”.

1.4 ESTANDARES DE LA NFPA QUE REGULAN LAS EXPLOSIONES DE MATERIAL PULVERIZADO

NFPA 654 (2006): Estándar para la prevención de fuegos y explosiones provocadas por materia pulverizado en el procesamiento y manejo de combustibles particulados. Esta norma detalla riesgos de combustibles particulados, requerimientos de construcción de edificios y tipo de equipo a usar en las operaciones que involucren materiales pulverizados.

NFPA 484 (2002): Estándar para combustibles metálicos y metales pulverizados. Esta norma establece los riesgos de los metales pulverizados y establece recomendaciones para limpieza, localización y construcción de plantas, procesamiento, operación y almacenamiento de combustibles metálicos pulverizados.

² National Fire Protection Agency (Agencia Nacional de Protección de Fuegos)

1.5 ANALISIS DE CAPAS DE PROTECCION (LOPA)³

LOPA es una herramienta semicuantitativa para analizar y evaluar riesgos industriales. Esta herramienta incluye métodos simplificados para evaluar la frecuencia y consecuencias de incidentes indeseados. Varias capas de protección son adicionadas a un proceso para disminuir la frecuencia de consecuencias indeseadas. Las capas de protección pueden incluir conceptos de seguridad inherente, sistemas de control básico, instrumentos de seguridad pasivos como paredes e instrumentos de seguridad activos como válvulas de seguridad.

El fin primario de LOPA es determinar si hay suficientes capas de protección para contrarrestar un escenario de accidente específico. Un escenario puede incluir una o varias capas de protección, dependiendo de la complejidad del proceso, y de la severidad potencial de un accidente.

Los principales pasos para un estudio de LOPA incluyen:

1. Identificar una única consecuencia
2. Identificar un escenario de accidente y la causa asociada con la consecuencia
3. Identificar el evento inicial y estimar la frecuencia del evento inicial.
4. Identificar las capas de protección (IPL⁴) adecuadas para esta consecuencia en particular y estimar la probabilidad de falla (PFD⁵) de cada capa de protección.
5. Combinar la frecuencia del evento inicial, con las probabilidades de falla de las capas de protección para obtener una frecuencia mitigada de la consecuencia para este evento inicial.
6. Evaluar si el riesgo es aceptable o no.

³ Layer of Protection Analysis (Análisis de Capas de Protección)

⁴ Independent Protection Layer (Capa de protección independiente)

⁵ Probability of Failure on Demand (Probabilidad de falla)

2. METODOLOGIA

2.1 IDENTIFICACION DE LOS RIESGOS DE PLANTAS QUE MANEJEN COMBUSTIBLES PULVERIZADOS

Las explosiones causadas por material pulverizado representan un serio problema en los procesos industriales, este tipo de incidentes han provocado la destrucción de plantas y equipos industriales, y accidentes mortales para los trabajadores.

Incidentes relacionados con recientes explosiones de material pulverizado en plantas de procesos de Estados Unidos han creado una atmósfera de preocupación en cuanto a los riesgos que representa el manejo de material pulverizado en plantas industriales. Sin embargo todavía no existe ningún estándar proveído por la OSHA⁶ que es la institución con autoridad nacional en seguridad industrial, para controlar el riesgo de explosiones de material pulverizado en la industria. No obstante, NFPA ha desarrollado estándares para prevenir y mitigar las explosiones de material pulverizado en plantas industriales.

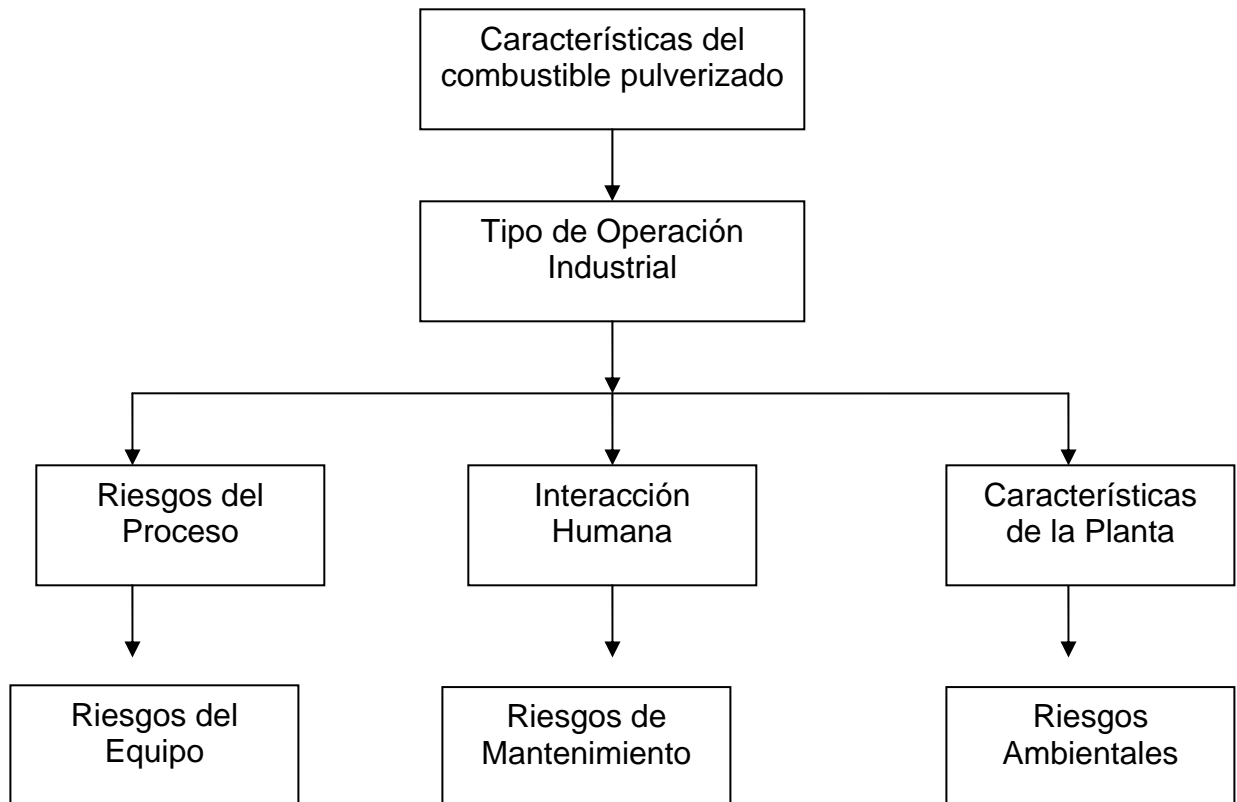
A pesar que los estándares desarrollados por NFPA son ampliamente reconocidos por los expertos como efectivos, su adopción en la industria ha sido pobre. De acuerdo con los reportes de CSB⁷ no todos los estados han adoptado los estándares proveídos por NFPA, y además las fichas técnicas de los materiales (MSDS) generalmente fallan al comunicar a los empleados y a la comunidad en general a cerca de los riesgos que genera el manejo de combustibles pulverizados.

⁶ Occupational Safety and Health Administration (Administración en seguridad y salud ocupacional)

⁷ Chemical Safety and Hazard Investigation Board (Agencia de investigaciones en seguridad y riesgo Químico)

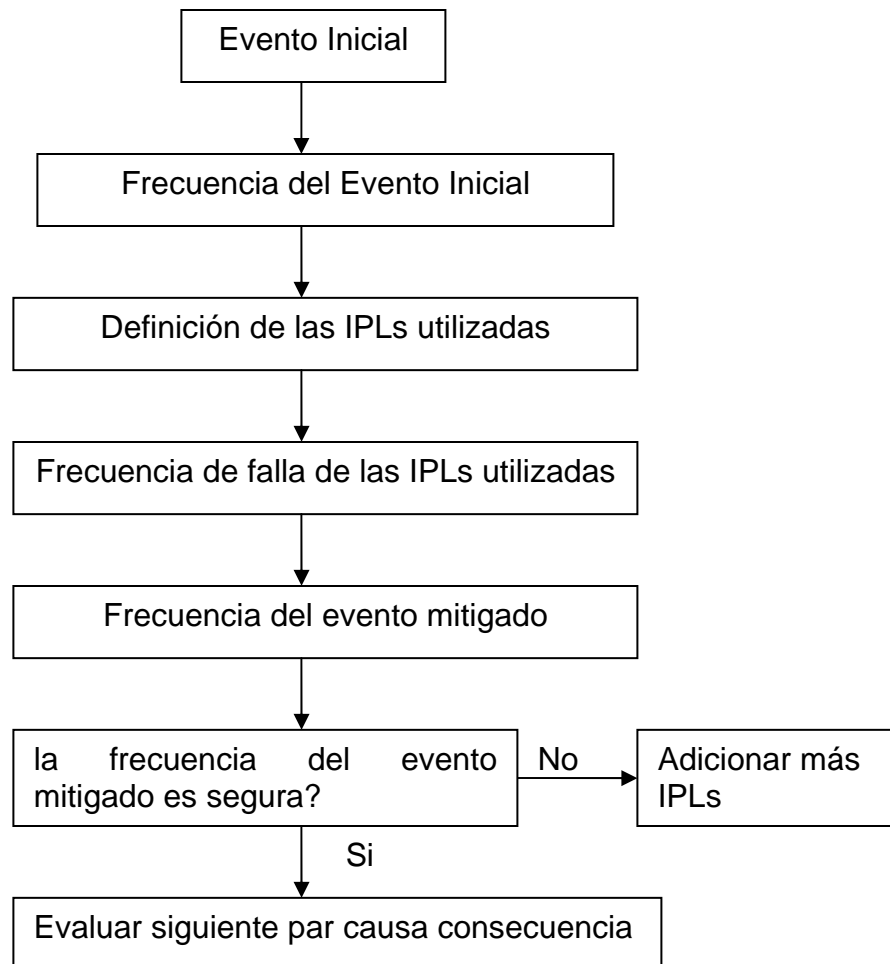
2.2 PROCEDIMIENTO PARA LA IDENTIFICACION DE RIESGOS RELACIONADOS CON COMBUSTIBLES PULVERIZADOS

Figura 2. Cuadro de Identificación de Riesgos relacionados con Combustibles Pulverizados



2.3 METODOLOGIA UTILIZADA PARA LA EVALUACION DE RIESGO MEDIANTE LOPA

Figura 3. Metodología utilizada para la evaluación de riesgo mediante LOPA



2.3.1 Identificación de escenarios con riesgos de explosiones provocadas por material pulverizado. Existen muchos materiales pulverizados que pueden generar situaciones de riesgo en los procesos industriales durante su transporte o almacenamiento, el estudio de riesgos de explosiones de material pulverizado que

se presenta aquí se realizó enfocado al almacenamiento de diferentes clases de materiales pulverizados en silos industriales.

Se analizaron diferentes tipos de materiales pulverizados susceptibles a cuasar explosiones cuando se encuentran dispersos en aire, se asumió su almacenamiento en silos de 10 m^3 de volumen, y se analizaron las consecuencias producidas por una explosión a diferentes radios de distancia. Se estudiaron los siguientes escenarios:

Tabla 1. Escenarios analizados para la aplicación de LOPA

Tipo de material pulverizado	Tamaño de Partícula (μm)	Concentración (g/m^3)	Presión máxima (P_{max}) <i>KPa</i>
Aluminio	10	70	1120
Celulosa	60	70	9300
Leche en polvo	165	70	8100
Silicona	10	125	10200

2.3.2 Identificación de Capas de Protección. De acuerdo con la utilización de LOPA hay tres reglas para clasificar las capas de protección independientes (IPLs) que se puedan añadir a un sistema:

1. La capa de protección independiente debe ser efectiva en prevenir consecuencias cuando esta funciona como esta diseñada para hacerlo.
2. La capa de protección independiente debe funcionar de manera independiente del evento inicial y de los componentes de las otras IPLs que se usen para prevenir el mismo escenario.
3. La probabilidad de falla de la capa de protección independiente debe estar sujeta a validación y revisión.

Para una planta industrial con peligro de explosiones de material pulverizado, las capas de protección independiente que deben tomarse en cuenta para prevenir este escenario pueden ser clasificadas así:

1. Diseño del proceso
2. Sistemas de Control
3. Intervención humana
4. Protección física
5. Plan de respuesta de emergencias de la planta
6. Plan de respuesta de emergencias de la comunidad

2.3.3 Estimación de la Frecuencia de los Escenarios. La frecuencia de ocurrencia para la consecuencia de un escenario específico sin capas de protección se computo utilizando la siguiente ecuación⁸:

$$F_{NS}^n = F_{atex} * P_{eff}^n * F_{dust}$$

Donde:

$$F_{NS} = \text{Frecuencia_del_escenario_sin_IPLs}$$

$$F_{atex} = \text{Frecuencia_de_ocurrencia_de_una_atmosfera_explosiva}$$

$$P_{eff} = \text{Pr obabilidad_de_ocurrencia_de_una_fuente_de_ignicion}$$

$$F_{dust} = \text{Frecuencia_explosiva_segun_el_tipo_de_material_pulverizado}$$

Teniendo en cuenta las capas de protección utilizadas para cada escenario, la frecuencia de una consecuencia para el escenario mitigado (n) con (j) IPL utilizada se calculo de la siguiente manera:

$$F_{ws}^n = F_{NS}^n \prod_{j=1}^{jn} PFD_{IPL}^{jn}$$

⁸ Procedimiento tomado de MARKOWSKI, Adam S., exLOPA for Explosion Risk Assessment, 8th Annual Symposium, Mary Kay O'connor Process Safety Center "Beyond Regulatory Compliance: Making Safety second Nature", Octubre 2005

$$F_{ws}^n = \text{frecuencia_del_evento_mitigado}$$

Donde: $F_{NS}^n = \text{frecuencia_del_escenario_sin_IPLs}$

$$PFD = \text{Pr obabilidad_de_falla_de_j_IPL}$$

Para que una explosión sea posible, la atmósfera explosiva debe estar entre el nivel de explosión bajo (LEL) y el nivel de explosión alto (UEL), y la fuente de ignición debe ser mayor que la energía mínima de ignición (MIE) de la mezcla explosiva.

Atmósferas inflamables pueden ocurrir y expandirse en diferentes áreas de la planta, pueden existir diferentes probabilidades de la ocurrencia de una atmósfera potencialmente explosiva formada por material pulverizado y aire en determinado lugar de la planta de procesos. Es un trabajo difícil juzgar el rango de estas atmósferas y su existencia probable, con este propósito, muchos países han establecido tres zonas para diferenciar las áreas con riesgos de explosión por mezclas gas – aire o material pulverizado – aire.

La clasificación de las frecuencias de ocurrencia de atmósferas explosivas se resume en el siguiente cuadro:

Tabla 2. Clasificación de atmósferas explosivas⁹

Áreas	Descripción	Frecuencia (evento/año)
20	Ocurren en operación normal	1
21	Ocurrencia probable en operación normal	10 ⁻²
22	Ocurren en fallas	10 ⁻³

⁹ Tabla tomada de Procedimiento tomado de MARKOWSKI, Adam S., exLOPA for Explosion Risk Assessment, 8th Annual Symposium, Mary Kay O'connor Process Safety Center "Beyond Regulatory Compliance: Making Safety second Nature", Octubre 2005

La identificación y análisis de la presencia de fuentes efectivas de ignición cercanas a las atmósferas explosivas es un paso clave en la prevención de explosiones. El problema es bastante complejo debido a la diferente naturaleza de las fuentes de ignición, localización de las atmósferas explosivas, efectos del tipo de material pulverizado y concentración, y tipo de medidas de mitigación. De hecho no hay un modelo real para incluir todos estos parámetros.

En orden de analizar la presencia de una fuente efectiva de ignición en determinado proceso, se debe proceder con la siguiente lista de preguntas:

1. Que clases de fuentes de ignición pueden estar presentes?
2. La energía de cierta fuente de ignición presente es mayor que la mínima energía de ignición (MIE) de la atmósfera explosiva?
3. Con que frecuencia una fuente de ignición identificada puede presentarse?

La probabilidad de ocurrencia de fuentes de ignición se muestra en el siguiente cuadro:

Tabla 3. Cuadro de categorización de las fuentes de ignición¹⁰

Categoría	Descripción	Probabilidad (evento/año)
Permanente	Descargas electrostáticas	1
Ocasional	Falla de control de parámetros de ignición y superficies calientes	10 ⁻¹
Raro	Falla grave de control de parámetros de ignición y flamas provenientes de otros incidentes	10 ⁻²

¹⁰ Tabla tomada de Procedimiento tomado de MARKOWSKI, Adam S., exLOPA for Explosion Risk Assessment, 8th Annual Symposium, Mary Kay O'connor Process Safety Center "Beyond Regulatory Compliance: Making Safety second Nature", Octubre 2005

A continuación se presentan las frecuencias de ignición para cada tipo de material pulverizado utilizado en este estudio:

Tabla 4. Frecuencia de ignición según el tipo de material pulverizado¹¹

Tipo de material pulverizado	Frecuencia de Ignición (evento/año)
Aluminio	0.14
Celulosa	0.02
Leche en polvo	0.25
Silicona	0.13

Los diferentes tipos de materiales pulverizados descritos en la tabla 4, junto con las fuentes de ignición y las atmósferas explosivas descritas en las tablas 2 y 3 se arreglan de la siguiente manera, para encontrar las frecuencias de los escenarios conjugados.

Tomando cada material pulverizado en la tabla 4, se calculan las frecuencias para los siguientes escenarios.

Tabla 5. Escenarios para cálculo de frecuencias en silicona

Escenario	Atmósfera explosiva	Fuente de Ignición
A	20	Permanente
B	21	Permanente
C	22	Permanente
D	20	Ocasional
E	21	Ocasional
F	22	Ocasional
G	20	Raro
H	21	Raro

¹¹ Eckhoff, R. K. Dust Explosions in the Process Industries, 3rd edition, Gulf Professional Publishing, Amsterdam, 2003

I	22	Raro
---	----	------

2.3.4 Categorización de las frecuencias de los escenarios. Para la categorización de las frecuencias de los escenarios se tuvo en cuenta la frecuencia con que ocurren explosiones relacionadas en la industria, la categorización de frecuencia empleada se resume en el siguiente cuadro:

Tabla 6. Caracterización de las frecuencias de los escenarios

Frecuencia (evento/año)	Categoría
A: $10^{-1} >$	Muy frecuente
B: $(10^{-1} - 10^{-2})$	Frecuente
C: $(10^{-2} - 10^{-3})$	Probable
D: $(10^{-3} - 10^{-4})$	Eventual
E: $(10^{-4} - 10^{-5})$	Inusual
F: $10^{-5} <$	Muy Inusual

2.3.5 Estimación de las consecuencias de los escenarios. Debido a que los software para simulación de explosiones de material pulverizado aun se encuentran en proceso de aprobación y a que en el momento en que se realizo la investigación MKOPSC¹² no contaba con licencias de dichos software, para la estimación de las consecuencias de los escenarios descritos anteriormente se utilizo la aproximación por el meto de equivalente de TNT, el cual se explica a continuación¹³.

¹² MKOPSC: Mary Kay O'connor Process Safety Center

¹³ Procedimiento tomado de CROWL. Daniel A and LOUVAR. Joseph F, Chemical Process Safety Fundamentals with Applications, second edition, Prentice Hall, 2002

En general las explosiones de material pulverizado o de gases resultan en un frente de reacción moviéndose hacia fuera de la fuente de ignición precedida por una onda de expansión o fuente de presión. Después que el material combustible es consumido, el frente de reacción termina, pero la onda de presión continúa su movimiento. Esta onda es la causante del mayor daño en las explosiones.

Experimentos con explosivos han demostrado que la sobrepresión en una explosión puede ser estimada utilizando un equivalente de masa de TNT utilizando la siguiente ecuación empírica:

$$z_e = \frac{r}{m_{TNT}^{1/3}}$$

z_e : Distancia _a _escala
 Donde: r : Distancia _desde _el _punto _de _explosion
 m_{TNT} : masa _equivalente _de _TNT

La presión escalada (p_s) se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$p_s = \frac{1616 \left[1 + \left(\frac{z_e}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{z_e}{0.048} \right)^2} * \sqrt{1 + \left(\frac{z_e}{0.32} \right)^2} * \sqrt{1 + \left(\frac{z_e}{1.35} \right)^2}}$$

La masa equivalente de TNT que produciría una explosión comparable a una determinada masa de combustible pulverizado se obtiene de las características explosivas del material pulverizado que provoca la explosión, el procedimiento utilizado es el siguiente:

$$m_{TNT} = \frac{n * P_{max} * c * v^2}{E_{TNT}}$$

n : eficiencia _de _la _explosion _ (1 – 5%)

P_{max} : Pr esion _ maxima _ en _ explsion _ del _ material _ pulverizado

Donde: c : concentracion _del _material _ pulverizado _ en _ aire

v : volumen _del _contenedor

E_{TNT} : Energia _de _explosion _de _TNT _ (4437 KJ / Kg)

Utilizando el procedimiento anterior se calculo la presión escalada (P_s), la cual se utilizó para estimar las consecuencias de explosiones de los escenarios mencionados. Dichas consecuencias pueden ser analizadas a diferentes distancias desde el punto de explosión, y fueron catalogadas de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 7. Descripción de daños ocasionados por explosiones¹⁴

Presión (KPa)	Descripción del daño	Categorización
0,14	Ruido molesto	Negligible
0,28	Ruido alto y molesto	Negligible
0.69	Rompimiento de ventanas pequeñas	Negligible
1.03	Presión de ruptura de vidrios	Negligible
2.07	Distancia segura para personas	Menor
2.76	Daño estructural menor	Menor
4.8	Daño menor a estructuras de vivienda	Menor
6.9- 13.8	Demolición parcial de viviendas	Media
15.8	Daño estructural severo	Media
20.7	Daño a maquinaria pesada	Grande
20.7 - 27.6	Ruptura de tanques de almacenamiento	Grande

¹⁴Tabla tomada de CROWL. Daniel A and LOUVAR. Joseph F, Chemical Process Safety Fundamentals with Applications, second edition, Prentice Hall, 2002

34.5 – 48.2	Destrucción completa de viviendas	Catastrófica
62<	Probable destrucción total de edificios y maquinaria pesada	Catastrófica

2.3.6 Categorización de las consecuencias de los escenarios. Para la categorización de las consecuencias de los escenarios se clasifico la severidad de las consecuencias de las explosiones de material pulverizado de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 8. Categorización de las consecuencias de los escenarios¹⁵

Categoría	Descripción
I negligible	Sin heridas y daños estructurales menores
II menor	Heridas menores y daños estructurales menores
III media	Heridas y daños estructurales medios
IV Grande	Heridas graves y daños estructurales medios
V Catastrófico	Heridas y daños estructurales graves

2.3.7 Evaluación de riesgo de los escenarios. Con base en las tablas 5 y 7, la evaluación del riesgo de los escenarios se realiza de acuerdo a la siguiente matriz de riesgos:

¹⁵ Tabla tomada de MARKOWSKI, Adam S., exLOPA for Explosion Risk Assessment, 8th Annual Symposium, Mary Kay O’connor Process Safety Center “Beyond Regulatory Compliance: Making Safety second Nature”, Octubre 2005

Tabla 9. Matriz de evaluación de riesgos¹⁶

	I	II	III	IV	V
A ($10^0 - 10^{-1}$)	M	M	I	I	I
B ($10^{-1} - 10^{-2}$)	T	M	M	I	I
C ($10^{-2} - 10^{-3}$)	A	T	M	M	I
D ($10^{-3} - 10^{-4}$)	A	T	T	M	M
E ($10^{-4} - 10^{-5}$)	A	A	T	T	M
F ($<10^{-6}$)	A	A	A	T	T

- **Riesgo Inaceptable (I):** Es un nivel de riesgo muy alto, por lo tanto es necesario tomar inmediatas acciones de reducción de riesgo con el fin de mitigar la gravedad de sus consecuencias y la frecuencia de los incidentes. Se recomienda realizar Análisis Cuantitativo de Riesgo (QRA).
- **Riesgo Moderado (M):** Es un nivel de riesgo alto, aunque no son necesarias las acciones inmediatas, si es necesario tomar medidas para evitar accidentes.
- **Riesgo Tolerable (T):** Es un nivel de riesgo bajo, pero aun puede requerir algunas medidas de prevención de no muy alto costo y/o fácil implementación.
- **Riesgo Aceptable (A):** Es un nivel de riesgo bajo y no requiere acciones para mitigar o prevenir accidentes.

¹⁶ Matriz de riesgos tomada de MARKOWSKI, Adam S., exLOPA for Explosion Risk Assessment, 8th Annual Symposium, Mary Kay O’connor Process Safety Center “Beyond Regulatory Compliance: Making Safety second Nature”, Octubre 2005

3. IMPLEMENTACION DE LA METODOLOGIA Y RESULTADOS

3.1 PREVENCIÓN DE RIESGOS DE EXPLOSIÓN EN PLANTAS QUE MANEJAN MATERIALES PULVERIZADOS

Graves accidentes relacionados con explosiones de material pulverizado han alertado las autoridades concernientes con seguridad industrial en Estados Unidos y han revelado las necesidades de la industria por adoptar estándares uniformes y conocidos en todos los estados, con el fin de prevenir accidentes explosivos relacionados con material pulverizado. OSHA es la única organización con autoridad nacional para establecer estándares de seguridad en plantas industriales con relación a los peligros explosivos de materiales pulverizados.

Un acuerdo para crear y adoptar estándares de seguridad laborales en plantas industriales relacionados con los peligros explosivos de materiales pulverizados es el primer paso necesario para crear reglas federales reconocidas en todos los estados con relación a este tipo de accidentes. También en orden de prevenir estos accidentes relacionados con explosiones de material pulverizado los estándares de seguridad que previenen este tipo de accidentes deben contener métodos de entrenamiento explícitos que se puedan aplicar fácilmente en las plantas industriales para entrenar al personal que maneja equipos con combustibles pulverizados a diario, así como técnicas de manejo de riesgo de materiales pulverizados como limpieza efectiva, procedimientos de operación de equipos, manejo de materiales inertes y humedad para evitar explosiones.

Los estándares de seguridad relacionados con explosiones de material pulverizado deben contener los siguientes tópicos:

- **Diseño de Planta:** Los riesgos de explosión de material pulverizado deben ser tomados en cuenta desde el diseño de la planta, esto significa por ejemplo, poner las fuentes de ignición lo mas lejos posible de los equipos que manejan material pulverizado, así como listar los equipos que manejan materiales pulverizados y tener la capacidad de aislar equipos que almacenan material pulverizado para evitar explosiones secundarias en caso de presentarse una explosión primaria en cualquier otro lugar de la planta. De cualquier manera, si los riesgos de explosiones de material pulverizado no son tomados en cuenta desde el diseño de la planta, debe existir un procedimiento para identificar debilidades en el diseño de la planta que puedan aumentar el riesgo de explosiones y procedimientos que puedan servir para mitigar estos efectos.
- **Limpieza:** Este es un procedimiento simple pero efectivo en la prevención de explosiones causadas por material pulverizado, esta actividad debe ser efectuada con una frecuencia adecuada y teniendo cuidado de cubrir cualquier área escondida donde se pueda acumular material pulverizado. Sistemas de limpieza por vacío también pueden ser utilizados para remover acumulaciones de material pulverizado en áreas inaccesibles para ser limpiados por otros métodos.
- **Protección contra explosiones:** Tomar todas las medidas de prevención necesarias para evitar explosiones es tan importante como estar preparados para responder en caso de accidentes, por lo tanto cualquier estándar preventivo de explosiones debe contener procedimientos de acción en caso de explosión para minimizar el daño a la planta, al personal y al ambiente.
- **Procedimientos de Operación:** En orden de prevenir y mitigar las consecuencias de las explosiones causadas por materiales pulverizados es necesario tener procedimientos de operación claros que ayuden a los empleados de las plantas a evadir el riesgo de situaciones peligrosas. Estos procedimientos deben incluir frecuencias de limpieza, identificación de situaciones en las que se deban apagar los equipos para evitar peligros, así

como sesiones periódicas en las que se revise la planta en busca de posibles riesgos.

- Entrenamiento de los empleados: Varios accidentes han sido causados por fallas en el entrenamiento o en la comunicación entre los empleados de las plantas implicadas, es por esto que el entrenamiento con referencia a los peligros de explosiones de material pulverizado debe ser administrado a todo el personal de la planta y no solo al personal que maneja equipos con material pulverizado. Los procedimientos de entrenamiento deben contener información a cerca de los riesgos del manejo de material pulverizado, así como presentación de la importancia del equipo de protección y procedimientos de seguridad para evitar explosiones, revisión de los mas importantes casos históricos y sus principales causas y entrenamiento a cerca de los procedimientos de acción en casos de emergencias. El entrenamiento de los empleados debe ser dividido en sesiones iniciales para conocer los riesgos de explosiones y sesiones periódicas para refrescar el conocimiento de los empleados con relación a estos riesgos.

3.2. RIESGOS INDUSTRIALES RELACIONADOS CON COMBUSTIBLES PULVERIZADOS

En la sección 2.2, se explico el procedimiento para determinar los mayores riesgos industriales con relación a las explosiones de combustibles pulverizados, en esta sección se resumen y se clasifican estos riesgos de acuerdo al método presentado en la figura 2.

3.2.1. Características del Combustible Pulverizado. La NFPA reconoce como combustible pulverizado a cualquier material particulado que presente riesgos de explosión y cuyo tamaño sea igual o menor a 420 micrones. Los combustibles pulverizados generalmente presentan forma irregular y su riesgo de explosión

aumenta si se trata con combustibles pulverizados con baja energía de ignición y baja temperatura de ignición.

3.2.2. Operaciones de Proceso Riesgosas

Tabla 10. Operaciones de proceso riesgosas

Tipo de Operación	Riesgos
Operaciones de reducción de tamaño	Velocidades altas y presencia de finos
Operaciones de mezcla de sólidos	Velocidades altas y carga electrostática
Operaciones de Secado	Baja temperatura de ignición y carga electrostática
Transporte y Almacenamiento	Calentamiento, carga electrostática y transporte neumático
Colectores de material pulverizado	Riesgos de carga electrostática y efectos térmicos

3.2.3. Riesgos en Planta

Tabla 11. Riesgos en planta

Clasificación	Riesgo
Equipos eléctricos	Chispas y sobrecalentamiento
áreas de proceso	Acumulación de material pulverizado en áreas de proceso
Procesos en áreas cercanas a líquidos y vapores inflamables	Explosiones híbridas material pulverizado/vapor
Líneas de Vapor	Ruptura de la línea e ignición del material pulverizado

3.2.4. Riesgos Ambientales

Tabla 12. Riesgos ambientales

Factor ambiental	característica	Riesgo
Humedad	Muy baja	Carga electrostática
Temperatura	Muy alta	Ignición térmica
Presión	Muy alta	Mas oxígeno, peligro de mezcla de fácil ignición

3.2.5. Riesgos en Operaciones de Mantenimiento

Tabla 13. Riesgos en operaciones de mantenimiento

Operación de mantenimiento	Riesgo
Reemplazo de partes de equipos	Nube de material pulverizado e ignición
Paradas continuas en el proceso	Nube de material pulverizado e ignición

3.2.6. Riesgos Inducidos por elementos Humanos

Tabla 14. Riesgos inducidos por elementos humanos

Actividad	Riesgo
Limpieza deficiente	Acumulación de material pulverizado, puede provocar nube de material pulverizado e ignición
Contenedores de material pulverizado abiertos	Formación e ignición de nube de material pulverizado
Paradas durante el proceso	Pueden generar nubes de material pulverizado o proveer fuentes de ignición y provocar explosiones secundarias
Interpretación errónea del estado del proceso	Puede provocar o dejar de prevenir nubes de material pulverizado, fuentes de ignición y explosiones primarias

3.3. DESARROLLO DE CAPAS DE PROTECCION PARA PROTECCION CONTRA EXPLOSIONES DE MATERIAL PULVERIZADO

Las medidas de seguridad integradas por capas de protección deben funcionar ante amenazas de fuegos o explosiones para prevenir o mitigar al más alto nivel posible los riesgos para trabajadores de la planta y la comunidad en general.

Las precauciones contra explosiones de material pulverizado recaen sobre una categoría de tres capas de protección llamadas capas de prevención, protección y mitigación; cada capa debe consistir de un número determinado de capas de protección independientes (IPL).

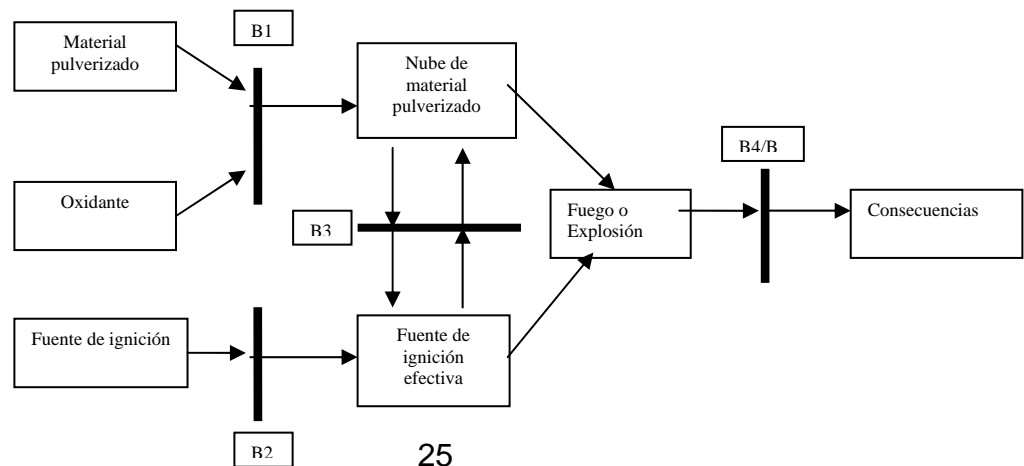
El propósito de la capa de prevención es asegurar que las condiciones bajo las cuales una explosión es posible nunca ocurran en la planta.

La capa de protección tiene como propósito limitar los efectos de un fuego o explosión, el cual se asume de ocurrencia certera.

Finalmente la capa de respuesta esta programada para mitigar las consecuencias para los trabajadores y la comunidad ante cualquier fuego o explosión que se pueda presentar.

A continuación se presenta un esquema que ilustra la utilización de las capas de protección mencionadas:

Figura 4: Esquema de las capas de protección contra fuegos o explosiones de material pulverizado



Capa de prevención (B1, B2, B3)

Capas de protección y mitigación (B4, B5)

En las siguientes tablas se muestran las diferentes capas de protección que pueden ser utilizadas para prevenir y mitigar las consecuencias de explosiones relacionadas con materiales pulverizados y su respectiva probabilidad de falla (PFD), usada para realizar análisis con LOPA.

3.3.1. Capas de protección sobre la atmósfera explosiva (B1)

Tabla 15. Capas de protección sobre la atmósfera explosiva

Capa de Protección Independiente	PFD (evento/año)
Uso de sustitutos para sustancias inflamables	10^{-2}
Mantener la concentración fuera de los límites explosivos	10^{-1}
Uso de inertes	10^{-1}
Limpieza	No hay valor exacto

3.3.2. Capas de protección sobre las fuentes de ignición (B2)

Tabla 16. Capas de protección sobre las fuentes de ignición

Capa de Protección Independiente	PFD (evento/año)
Operación bajo condiciones seguras	10^{-1}
Control de fuentes de ignición en equipo eléctrico	10^{-1}
Control de fuentes de ignición en equipo no eléctrico	10^{-1}

3.3.3. Capas de protección sobre los puntos de operación del proceso (B3)

Tabla 17. Capas de protección sobre los puntos de operación del proceso

Capa de Protección Independiente	PFD (evento/año)
Operación bajo condiciones seguras	10^{-1}
Procedimientos de operación seguros	10^{-1}

3.3.4. Capas de protección y mitigación (B4/B5)

Tabla 18. Capas de protección y mitigación

Capa de Protección Independiente	PFD (evento/año)
Sistemas de supresión de fuegos	10^{-2}
Sistemas de detección de fuegos	10^{-1}
Inhibidores de detonación	10^{-2}
Aislamiento del sistema	10^{-1}
Sistemas de contenimiento	10^{-2}

3.4. FRECUENCIAS DE LOS ESCENARIOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos siguiendo el procedimiento descrito en la sección 2.3.3, aplicado a los escenarios descritos en la tabla 5, y tomando la silicona como material pulverizado.

Tabla 19: Resultados de las frecuencias de los escenarios

Escenario	Frecuencia	Descripción
I	$1.3 \cdot 10^{-1}$	Frecuente
II	$1.3 \cdot 10^{-3}$	Eventual

III	$1.3 \cdot 10^{-4}$	Inusual
IV	$1.3 \cdot 10^{-3}$	Eventual
V	$1.3 \cdot 10^{-4}$	Inusual
VI	$1.3 \cdot 10^{-5}$	Muy Inusual
VII	$1.3 \cdot 10^{-5}$	Muy Inusual
VIII	$1.3 \cdot 10^{-5}$	Muy Inusual
IX	$1.3 \cdot 10^{-6}$	Muy Inusual

De la tabla de frecuencias se pueden observar que con excepción de los escenarios I, II y IV, los eventos estudiados pueden ser catalogados como inusuales. Para los escenarios con descripciones frecuente y eventual, se debe mirar la posición que ocupan en la matriz de riesgo para determinar si se necesitan análisis o acciones posteriores para disminuir su riesgo.

3.5. CONSECUENCIAS DE LOS ESCENARIOS

Las consecuencias de los escenarios descritos en la tabla 5, y en la tabla 1 se calcularon según el procedimiento descrito en la sección 2.3.5, dado que se tomó una concentración de material pulverizado en aire ligeramente mayor a la concentración mínima susceptible a explosión, se considera la atmósfera explosiva como clase 21 o de ocurrencia probable en operación normal, para este efecto, se tienen en cuenta las fuentes de ignición ocasionales dentro de la operación de una planta, es decir superficies calientes o fallas de control en los parámetros de ignición, por lo tanto para cada material pulverizado, se toman en cuenta las frecuencias para el escenario 5.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el cálculo de las consecuencias de una explosión de sílica pulverizada a diferentes distancias.

Tabla 20. Consecuencias para explosión de silicona pulverizada

Distancia (m)	Presión escalada (Kpa)	Descripción	Daño
5	391	destrucción total de edificios y maquinaria pesada	Catastrófico
10	81	Destrucción total de edificios y maquinaria pesada	Catastrófico
20	16	Daño estructural severo	Medio
50	2,9	Daño estructural menor	Menor

De la tabla de consecuencias se puede observar que una explosión de silicona pulverizada bajo las condiciones descritas sería catastrófica a pequeñas distancias, dependiendo de su posición en la matriz de riesgo, es probable que se necesiten medidas de seguridad para aminorar el riesgo de una explosión de estas características.

3.6. MATRIZ DE RIESGO PARA LOS ESCENARIOS

Con el objetivo de clasificar el riesgo de los escenarios para los cuales se calculó la frecuencia de ocurrencia y las posibles consecuencias en las secciones 3.5 y 3.6, se deben clasificar los escenarios en la matriz de riesgo, para determinar si es necesario aplicar mayores medidas de seguridad para prevenirlos. A continuación se muestran los escenarios considerados para evaluar la matriz de riesgos.

Tabla 21. Frecuencias y consecuencias de los escenarios evaluados

Escenario	Material pulverizado	Frecuencia	categorización	Consecuencia (Ps) KPa	categorización
1	Aluminio	$1.4 \cdot 10^{-4}$	inusual	2.9	Menor
2	Silicona	$1.3 \cdot 10^{-4}$	inusual	16	Grande
3	Leche en polvo	$2.5 \cdot 10^{-4}$	inusual	9.13	Medio
4	Celulosa	$2 \cdot 10^{-5}$	Muy inusual	10,03	Medio

Para todos los escenarios presentados en la tabla 21 se tomo una distancia de 20 m para cuantificar las consecuencias, y atmósfera explosiva clase 21 y fuente de ignición ocasional, para el cálculo de las frecuencias.

Aunque por simple observación se podría concluir que la probabilidad de ocurrencia de un evento de este tipo es realmente baja, y que con excepción de la silicona pulverizada, cuya consecuencia esta categorizada como grande, las consecuencias de los demás escenarios no necesitarían mayores medidas de prevención. Sin embargo, para poder realizar conclusiones de este tipo es importante tener en cuenta la posición que ocupan los escenarios alisados en una matriz de riesgo.

Tabla 22. Matriz de riesgos para los escenarios analizados

	I	II	III	IV	V
A ($10^0 - 10^{-1}$)	Yellow	Yellow	Red	Red	Red
B ($10^{-1} - 10^{-2}$)	Green	Yellow	Yellow	Red	Red
C ($10^{-2} - 10^{-3}$)	White	Green	Yellow	Yellow	Red
D ($10^{-3} - 10^{-4}$)	White	Green	Green	Yellow	Yellow
E ($10^{-4} - 10^{-5}$)	1	3	2	Green	Yellow
F ($<10^{-6}$)	White	4	White	Green	Green

De la matriz de riesgos se puede observar que los escenarios 1, 3 y 4 se ubican dentro de las casillas de riesgo aceptable, por lo tanto no se necesita añadir medidas de seguridad para su prevención o mitigación, sin embargo, aunque el escenario 2 se encuentra ubicado en una casilla de riesgo tolerable, que implica riesgo bajo, valdría la pena considerar algunas medidas de precaución para disminuir su riesgo.

Algunas medidas de bajo costo para disminuir el riesgo del escenario 2 serian implementar capas independientes de protección de seguridad inherente como

realizar limpieza y garantizar operaciones seguras de operación en aspectos concernientes a las operaciones que impliquen el manejo de silicona pulverizada. Estas son las probabilidades de falla para estas capas de protección:

- Mantener la concentración del material pulverizado fuera de los límites de explosión: $1 \cdot 10^{-1}$
- Condiciones seguras de operación: $1 \cdot 10^{-1}$
- Procedimientos de trabajo seguros: $1 \cdot 10^{-1}$

En la sección 3.3 se muestran las PFD para algunas otras capas de protección que pueden ser implementadas, la frecuencia de los escenarios con estas capas de protección se pueden calcular siguiendo el procedimiento descrito en la sección 2.3.3.

Tabla 23. Frecuencia de los escenarios mitigados

Escenario	Frecuencia (evento/año)
1	$1.4 \cdot 10^{-7}$
2	$2 \cdot 10^{-8}$
3	$2.5 \cdot 10^{-7}$
4	$1.3 \cdot 10^{-7}$

A continuación se muestra la matriz de riesgos para los escenarios mitigados con el fin de evaluar el nivel de riesgo de los escenarios con las capas de protección implementadas.

Tabla 24. Matriz de riesgos para los eventos mitigados

	I	II	III	IV	V
A ($10^0 - 10^{-1}$)					
B ($10^{-1} - 10^{-2}$)					
C ($10^{-2} - 10^{-3}$)					
D ($10^{-3} - 10^{-4}$)					
E ($10^{-4} - 10^{-5}$)					
F ($<10^{-6}$)	1	3, 4	2		

De la matriz de riesgo se puede observar que con la implementación de algunas capas de protección de fácil utilización se logra poner todos los escenarios analizados en riesgo aceptable, lo cual demuestra la efectividad de realizar análisis de capas de protección como medio de prevención y mitigación de explosiones relacionadas con materiales pulverizados.

CONCLUSIONES

- Las explosiones provocadas por materiales pulverizados, si bien, no son tan comunes como aquellas provocadas por combustibles líquidos o gaseosos, si han demostrado ser un grave peligro para las plantas industriales, es por esto, que tomar medidas serias en cuanto a su prevención y mitigación es de vital importancia para mantener operaciones industriales seguras en las plantas donde se manejan este tipo de combustibles.
- En cuanto a la prevención de explosiones provocadas por materiales pulverizados, métodos de análisis de riesgos como el análisis de capas de protección (LOPA) o el análisis cuantitativo de riesgo (QRA) son técnicas fáciles de aplicar desde el diseño de la planta y durante su puesta en marcha, que pueden disminuir considerablemente el riesgo de explosiones de este tipo, y aun cuando incidentes llegaran a ocurrir, garantizarían la mitigación de los danos y el conocimiento de los empleados para responder ante emergencias de este tipo.
- Para los escenarios analizados con LOPA, aunque la matriz de riesgos no mostró escenarios catastróficos, si existe un riesgo tolerable que debe ser prevenido mediante la aplicación de capas independientes de protección (IPL), las cuales muestran ser efectivas en la prevención de este tipo de incidentes. Las capas independientes de protección a utilizar pueden ser diferentes para cada planta y cada situación, aunque para un escenario de riesgo tolerable no se recomienda añadir barreras físicas que impliquen una gran inversión, si no

enfocar esfuerzos en la mejora de la limpieza y mantenimiento de los equipos que manejar combustibles pulverizados para evitar acumulaciones.

RECOMENDACIONES

- En Estados Unidos, país donde fue realizado este estudio, pese a los catastróficos incidentes concernientes a este tipo de combustibles ocurridos en los últimos años, aun no existen normas estandarizadas, conocidas y adoptadas por todos los estados y que se encarguen de prevenir y mitigar este tipo de incidentes; por lo tanto el primer paso para eliminar el riesgo de estos accidentes, es buscar la forma de acordar normas relacionadas con la prevención de estos incidentes y lograr que sean adoptadas por todos los estados, para evitar diferencias de información que puedan resultar en normas confusas y difíciles de poner en practica.
- Los procedimientos de prevención y mitigación de explosiones relacionadas con materiales pulverizados, deben estar enfocados en cuatro ejes principales, Limpieza para evitar acumulación de material pulverizado en cualquier punto de la planta. Entrenamiento del personal, ya que es importante que todo el personal de la planta conozca los riesgos que enfrenta y este preparado para asumirlos. Procedimientos de operación, que garanticen que la planta opere siempre de manera segura fuera de los limites de explosividad, y por ultimo Planeamiento de respuesta y mitigación, por que es tan importante prevenir los incidentes como estar preparados para enfrentarlos cuando estos son inminentes.
- La seguridad industrial es un punto clave en el diseño y puesta en marcha de cualquier planta industrial, por lo tanto, metodologías de análisis de riesgo no deberían ser solo opcionales en el diseño de planta, los métodos de análisis de riesgos como el expuesto en este trabajo (LOPA), y otros tantos, que difieren en su modo de aplicación pero que cumplen con el mismo objetivo, y es

realizar un trabajo de prevención de la planta contra cualquier riesgo indeseado, deben ser puntos clave en el diseño de cualquier planta de proceso, y su aplicación y evaluación debe continuar durante todo el tiempo que la planta este operando.

BIBLIOGRAFIA

1. CROWL. Daniel A and LOUVAR. Joseph F, Chemical Process Safety Fundamentals with Applications, second edition, Prentice Hall, 2002
2. U.S Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB), Investigation Report on Combustible Dust Hazard Study, Noviembre 2006
3. U.S Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB), West Pharmaceutical Services Investigation Report, Septiembre 2004
4. U.S Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB), Hayes Lemmerz International. Inc Investigation Report, Septiembre 2005
5. U.S Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB), CTA Acoustic Dust Explosion Fire Investigation Report, Febrero 2005
6. MARKOWSKI, Adam S., exLOPA for Explosion Risk Assessment, 8th Annual Symposium, Mary Kay O'connor Process Safety Center "Beyond Regulatory Compliance: Making Safety second Nature", Octubre 2005
7. Eckhoff, R. K. Dust Explosions in the Process Industries, 3rd edition, Gulf Professional Publishing, Amsterdam, 2003

ANEXO A. HISTORIA DE LOS INCIDENTES RELACIONADOS CON EXPLOSIONES DE MATERIAL PULVERIZADO

- **explosión en una bodega de harina, en Turín, Diciembre de 1785**

Es tal vez uno de los primeros accidentes reportados relacionados con explosiones de material pulverizado. La severidad de la explosión no fue muy alta, sin embargo, de ella se aprendieron importantes lecciones que aun se aplican en la prevención de este tipo de accidentes.

- **explosión en un silo para almacenamiento de granos, en Corpus Christi, Texas, Abril de 1981**

En esta explosión 9 personas murieron y 30 resultaron heridas, las perdidas de material reportadas fueron cercanas al los U\$ 30 millones. La causa probable de la explosión fue una masa de sorgo encendida que fue cargada en un elevador junto con el grano, lo que provoco el incendio de la nube de grano pulverizado.

- **explosión en la planta de West Pharmaceutical Services, en Kinston, Carolina del Norte, Enero de 2003**

En enero 29 de 2003, una explosión destruyo la planta de West Pharmaceutical Services en Kinston, Carolina del Norte causando 6 muertes, docenas de heridos y pérdidas cuantiosas. El combustible que genero la explosión fueron finos del polvo plástico que se había acumulado por encima de un techo suspendido en el área de producción de la planta.



- **CTA Acoustic, Corbin, KY, Febrero de 2003**

En febrero 20 de 2003, una explosión causo serios daños a la planta de CTA Acoustic, en Corbin, Kentucky, hiriendo de muerte a 7 trabajadores, la planta producía fibra de vidrio para la industria automovilística. La explosión fue causada por finos de una resina fenolica que se acumularon en el área de producción.



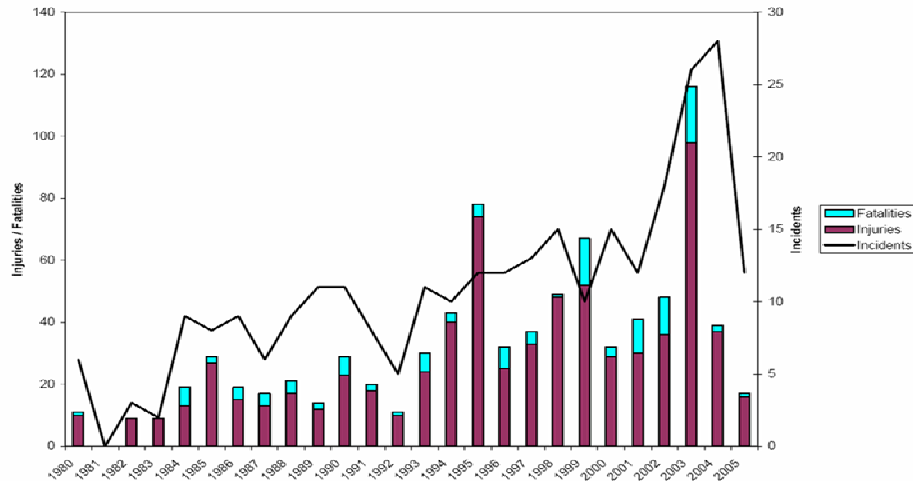
- **Hayes Lemmerz, Huntington, IN, Octubre de 2003**

En Octubre 29 de 2003, una serie de explosiones causaron serias quemaduras a dos trabajadores y originaron cuantiosas pérdidas en la planta de Hayes Lemmerz en Huntington, Indiana. La planta moldeaba ruedas de aluminio, la explosión fue causada por aluminio pulverizado que se acumulo en la zona de producción.



ANEXO B: ESTADISTICAS DE LAS EXPLOSIONES EN LOS ULTIMOS 25 ANIOS EN ESTADOS UNIDOS

De acuerdo con investigaciones realizadas por la Agencia de Investigaciones en Seguridad y Riesgo Químico (CSB) de Estados Unidos, al menos 281 incidentes relacionados a la explosión o incineración de material pulverizado en plantas industriales han ocurrido en instalaciones industriales de Estados Unidos desde 1980 hasta 2005.



La investigación realizada por la CSB también arrojó resultados a cerca de las industrias que han sido mas susceptibles a este tipo de explosiones durante los últimos 25 años, a continuación se muestran las estadísticas de explosiones de material pulverizado según el tipo de industria.

