

08-010

IDENTIFICATION, ANALYSIS AND RISK ASSESSMENT OF EXPLOSIVE ATMOSPHERES IN AN AGROCHEMICAL PROCESSING AND HANDLING PLANT

Fuentes-Bargues, José Luis ⁽¹⁾; *Andrés Jiménez, Thais* ⁽²⁾; *Armero Martínez, Antonio* ⁽¹⁾; *Vivancos Bono, José Luis* ⁽¹⁾

⁽¹⁾ GIDDP. Universitat Politècnica de València, ⁽²⁾ Universitat Politècnica de València

An explosive atmosphere is defined as the mixture with air, under atmospheric conditions, of flammable substances, in the form of gas, vapour, mists, dusts and fibres, which after ignition, combustion spreads to the entire unburned mixture. According to Royal Decree 681/2003, on the protection of the health and safety of workers exposed to risks derived from explosive atmospheres in the workplace, any installation that handles or stores flammable substances must be designed, constructed, operated and maintained with the aim of minimizing any escape of flammable products, thus avoiding the risk of formation of explosive atmospheres. This normative requirement is translated in the accomplishment of an identification, analysis and evaluation of risks of formation of explosive atmospheres. The results of the assessment will make it possible to establish preventive measures to prevent the emergence of ignition sources in areas at risk of explosive atmospheres. The aim of this communication is to carry out the identification, analysis and risk assessment of explosive atmospheres in an agrochemical processing and handling plant.

IDENTIFICACIÓN, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RIESGOS DE ATMÓSFERAS EXPLOSIVAS EN UNA PLANTA DE ELABORACIÓN Y MANIPULACIÓN DE PRODUCTOS AGROQUÍMICOS

Una atmósfera explosiva se define como la mezcla con aire, en condiciones atmosféricas, de sustancias inflamables, en forma de gas, vapor, nieblas, polvos y fibras, que tras la ignición, la combustión se propaga a la totalidad de la mezcla no quemada. De acuerdo al Real Decreto 681/2003, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo, toda instalación que maneje o almacene sustancias inflamables, debe ser diseñada, construida, operada y mantenida con el fin de reducir al mínimo cualquier escape de producto inflamable, evitando así el riesgo de formación de atmósferas explosivas. Este requerimiento normativo se traduce en la realización de una identificación, análisis y evaluación de riesgos de formación de atmósferas explosivas. Los resultados de la evaluación permitirán establecer las medidas preventivas para impedir la aparición de fuentes de ignición en zonas con riesgo de formación de atmósferas explosivas. El objeto de esta comunicación es realizar la identificación, análisis y evaluación de riesgos de atmósferas explosivas en una planta de elaboración y manipulación de productos agroquímicos.



©2020 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

Una explosión es una reacción química de combustión que se produce entre el oxígeno y un material oxidable, que va acompañada de desprendimiento de energía y habitualmente se manifiesta por incandescencia o llama. Para que la reacción tenga lugar se requiere de la simultaneidad de cinco factores: comburente, combustible, atmósfera explosiva, fuente de ignición y confinamiento.

Uno de los factores es la atmósfera explosiva, que se define como la mezcla con aire, en condiciones atmosféricas¹, de sustancias inflamables (en forma de gas, vapor, nieblas, polvos y fibras) donde tras la ignición, la combustión se propaga a la totalidad de la mezcla no quemada.

El Real Decreto 681/2003 (España 2003), sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo, transpuso la Directiva Europea 1999/92/CE (Unión Europea 2000) y estableció que toda instalación que maneje o almacene sustancias inflamables, debe ser diseñada, construida, operada y mantenida con el fin de reducir al mínimo cualquier escape de producto inflamable, evitando así el riesgo de formación de atmósferas explosivas.

Este requerimiento normativo se traduce en la realización de una identificación, un análisis y una evaluación de riesgos de formación de atmósferas explosivas. Los resultados de la evaluación permitirán clasificar las zonas con riesgos de aparición de atmósferas explosivas y establecer las medidas preventivas para impedir la aparición de fuentes de ignición en zonas con riesgo de formación de atmósferas explosivas (Lisi, Milazzo y Maschio 2010). En esta evaluación se debe tener en cuenta tanto el factor técnico como el factor humano, por la importancia que puede tener en la formación de una atmósfera ATEX (Geng et al. 2015; Geng et al. 2020). Todos estos aspectos se deben reflejar, de acuerdo al RD 681/2003, en el Documento de Protección Contra Explosiones (DPCE), que refleja la pertinente evaluación y clasificación inicial y se deberá actualizar periódicamente. La actualización del DPCE es básica para garantizar una acción y mejora continua frente a los riesgos de explosión (García-Fayos et al. 2017).

Aunque la definición de las atmósferas explosivas sea común, hay que distinguir entre atmósfera explosiva de gas y de polvo, puesto que difieren en cuanto a parámetros de diseño, construcción, instalación, operación y mantenimiento, y en consecuencia también varía el proceso de evaluación de riesgos y clasificación de zonas con peligro de explosión.

2. Objeto y metodología

El objeto de esta comunicación es describir cómo se realiza el proceso de identificación, análisis y evaluación de riesgos, y la clasificación de zonas de riesgo de atmósferas explosivas (ATEX), a partir de los datos de un caso de estudio.

Para el caso de estudio se ha escogido una planta de elaboración y manipulación de productos químicos, en concreto se analizó el proceso de fabricación de famoxadona, componente esencial de productos fungicidas, pesticidas y biocidas, analizándose la atmósfera explosiva formada por gases. En el presente trabajo, por motivos de confidencialidad, solo se muestran datos referentes al proceso técnico de cálculo.

En la base de datos eMARS (Major Accident Report System) (Unión Europea 2017) se pueden consultar los accidentes de las industrias afectadas por las Directivas Seveso (actualmente en vigor la Directiva Seveso III: Directiva 2012/18/UE (Unión Europea 2012)) en Europa. Entre los años 1989 y 2019, se han producido un total de 36 accidentes en Europa en el sector industrial de producción de pesticidas, biocidas y

¹ Se entiende por condiciones atmosféricas cuando la temperatura está comprendida entre 20°C y 60 °C, y la presión está en el rango de 0,80 a 1,10 bares.

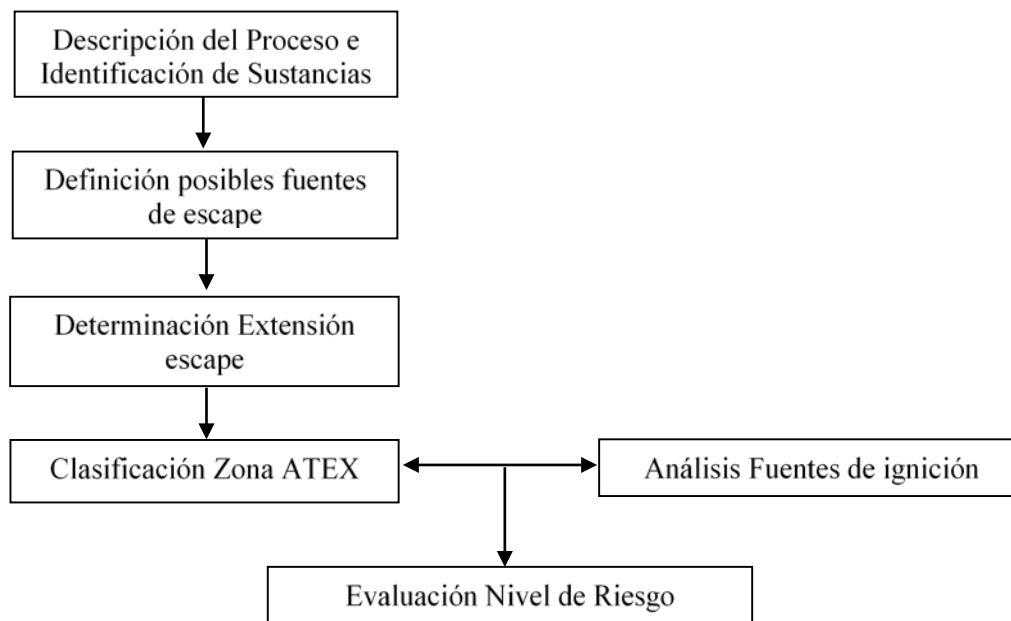
fungicidas, si bien se han reducido el número de accidentes en los últimos años como consecuencia, entre otros aspectos, de las exigencias normativas, entre ellas, la Directiva Seveso y la Directiva sobre atmósferas explosivas.

La metodología a seguir en el presente trabajo se refleja en la Figura 1. En primer lugar se identificarán las sustancias presentes en el proceso, así como sus parámetros, con objeto de conocer las condiciones más desfavorables que puedan suponer la formación de una atmósfera explosiva.

Una vez definidas las sustancias se localizarán los puntos en los que se producen (o podrían producirse en caso de fallo) escapes de sustancias inflamables al entorno. Una vez identificados los puntos de escape se calculará la extensión del escape (formación de charco, evaporación, etc.) en función de las propiedades fisicoquímicas de las sustancias, de la ventilación y de la presión y temperatura de trabajo, para ello se utilizarán las normas IEC 60079-10-1 (AENOR 2015) y UNE-EN 202007 (AENOR 2006). Con estos datos se clasificará la zona peligrosa y se determinará la probabilidad de que se forme una atmósfera explosiva.

Una vez clasificada la zona se analizará la presencia y la capacidad de las fuentes de ignición para originar una explosión en caso de entrar en contacto con una atmósfera explosiva. Y, como consecuencia, se determinará el nivel de riesgo que implica, mediante el método desarrollado por el Proyecto RASE (Explosive Atmosphere: Risk Assessment of Unit Operations and Equipment) (RASE Project 2000).

Figura 1: Metodología de identificación, clasificación y evaluación de riesgos de zonas ATEX. Fuente: Elaboración propia



3. Descripción del proceso productivo y de las sustancias empleadas

El punto de partida de la metodología es la información relativa al proceso de producción. Se dispondrá del diagrama de flujo y de los planos en planta de las instalaciones y equipos del proceso. Para cada uno de los nodos del esquema se identificarán las sustancias implicadas (materia prima, producto intermedio, producto acabado y residuos) con sus correspondientes propiedades.

Dada la confidencialidad del sistema productivo, simplemente se indica que el proceso de producción de la famoxadona se compone de las siguientes fases: secado azeotrópico, fosgenación, adición de fenilhidrazina, lavado con agua, concentración, cristalización, centrifugación, secado y envasado de producto final.

4. Clasificación de zonas con riesgo ATEX

La norma IEC60079-10-1:2015 permite proceder a la clasificación de zonas con riesgo ATEX por la presencia de gases, vapores, líquidos y nieblas inflamables. La probabilidad de explosión depende fundamentalmente de dos factores: la probabilidad de aparición de una atmósfera explosiva y la probabilidad de aparición de una fuente de ignición.

La norma IEC 60079-10-1:2015 describe tres métodos para realizar la clasificación de zonas: mediante un cálculo estadístico y numérico específico para cada fuente de escape, mediante normas nacionales y códigos de industria o por métodos simplificados. En este caso se procede mediante un cálculo numérico para cada una de las zonas del sistema productivo.

4.1. Determinación de las fuentes de escape

Se considera fuente de escape a cualquier punto o equipo que contenga un producto inflamable, como tanques, bombas, tuberías, válvulas, etc. El grado de escape es una medida de la probabilidad de aparición de una atmósfera explosiva, y se determina en función de la frecuencia y duración de la fuente de escape.

En entornos ATEX existen tres tipos de grados de escape: continuo (escape continuo o con una alta probabilidad de que se presente frecuentemente o durante largos periodos de tiempo); primario (escape con probabilidad de aparecer periódica u ocasionalmente en condiciones normales de operación) y secundario (fuga con poca probabilidad de ocurrir en condiciones normales de operación y que, en caso de presentarse, lo hará de forma anormal y durante cortos periodos de tiempo).

De forma general, cuanto mayor sea el grado de escape mayor será el área clasificada como zona ATEX. Por lo tanto, es preciso identificar la presencia de atmósferas inflamables en el interior de equipos o en el exterior de los mismos en caso de fuga o derrame. Todas las partes móviles de sistemas cerrados de proceso serán consideradas como fuentes de escape. Si por el contrario el equipo no contiene producto inflamable, o es completamente incapaz de permitir fugas por tratarse de uniones perfectamente soldadas o si se encuentra inertizado² mediante un procedimiento fiable, no dará lugar a una atmósfera explosiva.

Una vez localizada la fuente de escape se procede a determinar la tasa de escape, que es una medida de la cantidad de sustancia liberada por unidad de tiempo. La tasa de escape dependerá de la naturaleza del escape, de la velocidad del escape, de la concentración, de la volatilidad del líquido inflamable y de la temperatura del líquido.

La tasa de escape puede ser calculada por cualquiera de las normas indicadas en la tabla K.1 del Anejo K de la norma IEC60079-10-1:2015. En esta tabla se indica la norma italiana CEI 31-35, cuya traducción a la norma española se realiza por la norma UNE 202007:2006 IN.

La tasa de escape se calcula a partir de la expresión (1):

$$Q_g = 2 \cdot 10^{-3} \cdot A \cdot \frac{v_w}{f} \cdot r_{eq}^{-0,11} \cdot \frac{M \cdot p_a}{R \cdot T} \cdot \ln \left(\frac{p_a}{p_a - p_v} \right) \quad (1)$$

Donde:

| | |
|-------|---|
| Q_g | Tasa de escape de gas o vapor (kg/s). Dividir por la densidad ρ_g para obtener la tasa de escape volumétrica (m ³ /s) |
| A | Área del charco donde se producirá la evaporación del gas o vapor (m ²) |
| v_w | Velocidad del viento (m/s) |
| f | Factor de eficacia de la ventilación (adimensional) |

² En un proceso industrial la inertización consiste en la adición de un gas inerte para evitar la reacción de una sustancia con oxígeno en el interior de un equipo, de manera que no exista la suficiente cantidad de comburente para que se forme una atmósfera explosiva.

| | |
|----------|---|
| r_{eq} | Radio equivalente de la superficie de líquido de forma circular o cuadrangular. Se asume sección circular, luego $r_{eq} = (S/\pi)^{0.5}$ |
| M | Masa molar de la sustancia (kg/kmol) |
| R | Constante universal de los gases (8.314 J/kmol·°K) |
| T | Temperatura de operación del fluido (°K) |
| p_a | Presión atmosférica (101.325 Pa) |
| p_v | Presión de vapor del fluido a temperatura T (Pa) |

Para averiguar el radio equivalente es necesario obtener primero el área del charco formado. Esto puede conseguirse de dos formas:

1. Considerando el tiempo de intervención, t_p , necesario para detener la fuga sin tener en cuenta la evaporación del líquido en la superficie:

$$A_1 = \frac{V_t \cdot t_p}{h_m} \quad (2)$$

2. Considerando la evaporación del líquido con caudal W_t y planteando un equilibrio con el flujo gas.

$$A_2 = \frac{Q_t}{Q_{gs}} \cdot k_A \quad (3)$$

Donde:

| | |
|----------|---|
| V_t | Es el cociente entre la tasa Q_t y la densidad del líquido ρ |
| Q_t | Tasa de escape de líquido (kg/s·m ²) |
| Q_{gs} | Tasa específica de escape de gas o vapor (kg/s) |
| h_m | Profundidad del charco (m) |
| t_p | Tiempo de intervención o tiempo de duración de la fuga (s) |
| k_A | Factor de extensión del charco. Depende de la relación Q_t/Q_{gs} |

Si A_1 es menor que A_2 se tomará $A = A_1$ y se deberá verificar que Q_g es inferior o igual a Q_t (sino $Q_g = Q_t$). Si $A_1 \geq A_2$, se debe tomar $A = A_2$ y $Q_g = Q_t$.

Y finalmente, la tasa de escape del líquido y específica del gas, Q_t y Q_{gs} respectivamente, se obtienen de acuerdo a las siguientes ecuaciones facilitadas por la UNE 202007.

$$Q_t = C_d \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p} \quad (4)$$

$$Q_{gs} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{v_w}{f} \cdot \frac{M \cdot p_a}{R \cdot T} \cdot \ln\left(\frac{p_a}{p_a - p_v}\right) \quad (5)$$

Donde:

| | |
|------------|--|
| Q_t | Tasa de escape de líquido (kg/s) |
| Q_{gs} | Tasa específica de escape de gas o vapor (kg/s·m ²) |
| C_d | Coefficiente de descarga (adimensional) |
| S | Sección de la abertura a través de la cual es liberado el fluido (m ²), según la tabla B.1 proporcionada por la norma IEC 60079-10-1 (m ²) |
| ρ | Densidad del líquido (m ³ /s) |
| Δp | Diferencia de presión a través del orificio por el cual fluye el fluido (Pa) |
| v_w | Velocidad del viento (m/s) |
| f | Factor de eficacia de la ventilación (adimensional) |
| M | Masa molar de la sustancia (kg/kmol) |
| R | Constante universal de los gases (8.314 J/kmol·°K) |
| T | Temperatura de operación del fluido (°K) |
| p_a | Presión atmosférica (101.325 Pa) |
| p_v | Presión de vapor del fluido a temperatura T (Pa). |

4.2. Determinación del grado de ventilación

Para establecer el grado de influencia de la ventilación, entendiéndose ésta como el mecanismo por el cual el aire entra y sale de un espacio cerrado, es importante distinguir entre dilución (proceso por el cual las nubes de producto se diluyen en el aire reduciendo su concentración a lo largo del tiempo) y dispersión (proceso por el cual el producto inflamable liberado se extiende y propaga al entorno). Ambos conceptos son de gran importancia frente a la clasificación de zonas, puesto que, de manera general: cuanto mayor sea el factor de dispersión, mayor será la extensión de zona y cuanto mayor sea la dilución, menor será la extensión de zona.

De este modo es preferible ubicar los equipos en entornos abiertos siempre y cuando sea posible. De lo contrario, es imprescindible garantizar la circulación del viento mediante sistemas de renovación de aire en entornos cerrados. Para definir el grado de ventilación de un entorno es necesario determinar las siguientes características del entorno: la disponibilidad y eficacia de la ventilación, el grado de dilución de la zona y del entorno y la velocidad del viento del entorno.

4.2.1. Factor de eficacia de la ventilación (k)

El factor de eficacia de la ventilación k se obtiene de la norma IEC 60079-10-1. Para entornos cerrados y con una adecuada ventilación el valor de k sería igual a 4, para entornos abiertos (con presencia de un número elevado de impedimentos a la libre circulación del aire) el valor k es igual a 3 y para las arquetas de recogida de aguas y sumideros se ha seleccionado un valor de eficacia de k = 1, por estar bajo el nivel del suelo.

4.2.2. Grado de dilución

El grado de dilución puede ser Alto, Medio o Bajo, y queda definido mediante la Figura 2, procedente del Anexo C de la norma IEC 60079-10-1.

Para el uso del gráfico es necesario conocer el valor de la velocidad del viento y del característico del escape, que se obtiene a partir de la expresión (6):

$$\frac{Q_g}{\rho \cdot k \cdot LIE} \quad (6)$$

Donde:

| | |
|--------|---|
| Q_g | Tasa de escape de gas (kg/s) |
| ρ | Densidad del líquido (kg/m ³) |
| k | Factor de seguridad (debido a la incertidumbre del LIE) |
| LIE | Límite inferior de Explosividad |

4.2.3. Velocidad del viento en el entorno

La velocidad del viento en el entorno será para el caso de entornos abiertos, el valor obtenido a partir de la Tabla C.1 del Anexo C de la norma IEC 60079-10-1. Para el interior del edificio se calculara según el número de renovaciones por hora. En el caso de estudio, para el interior del edificio se definen 12 renovaciones por hora y un caudal de 0,02 m/s.

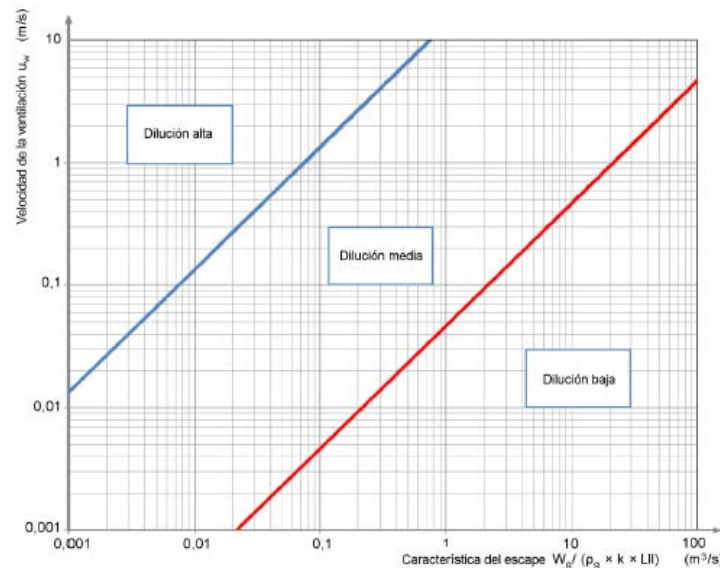
4.2.4. Disponibilidad de la ventilación

La disponibilidad de la ventilación depende de la ventilación natural o artificial. En el apartado 2.2.5.6 de la UNE 202007 se clasifica la ventilación en Muy Buena, Buena y Mediocre.

4.3. Tipo de zona

Una zona clasificada es un área en la cual existe o se prevé la existencia de una atmósfera explosiva en tal volumen que es necesario tomar medidas especiales para su diseño, construcción, instalación, operación y mantenimiento de los equipos.

Figura 2: Evaluación del grado de dilución. Fuente: Anejo C Norma IEC 60079-10-1



Existen tres tipos de zonas dependiendo de la probabilidad de aparición de una atmósfera explosiva para gases, vapores y líquidos inflamables (zonas 0, 1 y 2)

- Emplazamiento no clasificado: Zona en la que no se prevé la presencia de una atmósfera explosiva en un volumen tal que pueda requerir condiciones especiales para la construcción, instalación y manipulación de equipos.
- Zona 0: Área en la cual una atmósfera explosiva se encuentra presente de forma continua o durante largos periodos de tiempo o frecuencias. Es decir, existe una probabilidad muy alta de que se forme una atmósfera potencialmente explosiva. El interior de los equipos suele ser considerado como zona clasificada aunque no se presente una atmósfera explosiva, dado que cabe la posibilidad de que el aire entre en el interior de los mismos generando una mezcla explosiva. En el caso de utilizarse medidas de control específicas tales como la inertización, el interior de los equipos de proceso puede considerarse como zona no clasificada.
- Zona 1: Área en la cual es probable que se genere una atmósfera explosiva periódicamente u ocasionalmente en condiciones normales de operación.
- Zona 2: Área en la cual no es probable que se genere una atmósfera explosiva en condiciones normales de operación pero que, en caso de que ocurra, perdurará durante un breve periodo de tiempo.
- El acrónimo ED se le puede añadir a las diferentes zonas, con un significado de zona teórica de extensión despreciable en condiciones normales.

La clasificación de la zona se realizará a partir de la Tabla D.1 del Anejo D de la IEC 60079-10-1 (Figura 3).

4.4. Extensión de zona

La extensión de la zona es la distancia en cualquier dirección desde la fuente de escape en la que tendrá lugar la dilución de la mezcla de gas con aire hasta alcanzar una concentración por debajo del límite inferior de explosividad. La Figura 4 se utiliza para determinar la extensión de las zonas peligrosas para diversas formas de escape:

- a) Un escape de chorro libre a alta velocidad.
- b) Un escape de chorro de difusión con una baja velocidad o un chorro que pierde su impulso debido a la geometría del escape o que incide sobre superficies cercanas.
- c) Gases o vapores pesados que se propagan a lo largo de superficies horizontales, por ejemplo el suelo.

Figura 3: Tabla B.1. Fuente: Anejo B de la Norma UNE 202007:2006

| Grado de escape | Grado de la ventilación | | | | | | |
|-----------------|--|--|----------------------------|-----------|---------------------|---------------------|-----------------------------|
| | Alto | | | Medio | | | Bajo (6) |
| | Disponibilidad de la ventilación | | | | | | |
| | Muy buena | Buena | Mediocre | Muy buena | Buena | Mediocre | Muy buena, buena o mediocre |
| Continuo | Zona 0 ED (1) emplazamiento no peligroso | Zona 0 ED (1) + Zona 2 (3) | Zona 0 ED (1) + Zona 1 (3) | Zona 0 | Zona 0 + Zona 2 (3) | Zona 0 + Zona 1 (3) | Zona 0 |
| Primario | Zona 1 ED (1) emplazamiento no peligroso | Zona 1 ED (1) + Zona 2 (3) | Zona 1 ED (1) + Zona 2 (3) | Zona 1 | Zona 1 + Zona 2 (3) | Zona 1 + Zona 2 (3) | Zona 1 o Zona 0 (2) |
| Secundario | Zona 2 ED (1) emplazamiento no peligroso | Zona 2 ED (1) emplazamiento no peligroso (4) | Zona 2 ED (1) (4) | Zona 2 | Zona 2 (4) | Zona 2 (4) | Zona 1 o también Zona 0 (2) |

Figura 4: Determinación de extensión de emplazamientos peligrosos. Fuente: Anejo C Norma IEC 60079-10-1



5. Análisis de las fuentes de ignición

Para que se produzca una explosión, a parte de las condiciones de atmósfera explosiva, se tiene que cumplir la condición de la existencia o aparición de una fuente de ignición efectiva. Para poder finalizar la evaluación de riesgos de las diferentes zonas del proceso, se debe, para cada uno de los nodos del proceso productivo, analizar la presencia, efectividad y probabilidad de las distintas fuentes de ignición.

Se cita a continuación posibles fuentes de ignición que pueden aparecer en un proceso industrial:

- Superficies calientes.
- Llamas y gases calientes.
- Material eléctrico.
- Chispas de origen mecánico.
- Corrientes eléctricas parásitas.
- Electricidad estática (distinguiendo cuatro tipos: descargas en chispa, descargas en brocha, descargas en brocha propagante, descargas en cono).
- Rayo.
- Ondas electromagnéticas de radiofrecuencia entre 10^4 Hz y $3 \cdot 10^{12}$ Hz.
- Ondas electromagnéticas de entre $3 \cdot 10^{11}$ Hz y $3 \cdot 10^{15}$ Hz.
- Radiación ionizante.
- Ultrasonidos.
- Compresión adiabática y ondas de choque.

- Reacciones exotérmicas, incluyendo la autoignición del polvo.

6. Evaluación de Riesgos

La evaluación de riesgos es el proceso dirigido a estimar la magnitud de aquellos riesgos que no hayan podido evitarse, obteniendo la información necesaria para que el empresario esté en condiciones de tomar una decisión apropiada sobre la necesidad de adoptar medidas preventivas. En este caso se realiza una evaluación de riesgos cualitativa en base al método sistemático desarrollado en el Proyecto Europeo RASE.

Para determinar el nivel de riesgo de una zona clasificada por la presencia de sustancias inflamables, se ha de considerar la probabilidad de que ocurra una explosión conjuntamente con las consecuencias que ello supondría. Así mismo, la evaluación de riesgos ha de considerar todos y cada uno de los modos de operación utilizados en un proceso productivo, estos son:

- Condiciones normales de operación: situación en la cual un equipo opera de acuerdo a sus parámetros de diseño.
- Rutina de mantenimiento: procedimiento a realizar ocasional o periódicamente en condiciones normales de operación para mantener y garantizar el correcto funcionamiento de los equipos de proceso.
- Funcionamiento raro: tipo de mal funcionamiento esperado únicamente en raras ocasiones.
- Fallo catastrófico: suceso que excede los parámetros de diseño de la planta de proceso y del sistema de control resultando en una liberación de sustancia inflamable.
- Paradas y puestas en marcha.

La probabilidad de que una fuente de ignición sea efectiva dependiendo del tipo de zona en la que se encuentre se evalúa mediante la Tabla 2. Una vez obtenida la probabilidad y teniendo en cuenta la magnitud de las consecuencias listadas a continuación, se puede obtener el nivel de riesgo a partir de la Tabla 3.

- Catastróficas: Muerte de personas y/o pérdida de parte o del total de la instalación.
- Mayor: Daños graves en personas o instalaciones.
- Menor: Daños leves en personas o instalaciones.
- Despreciable: Daños mínimos en personas o instalaciones.

Tabla 2: Evaluación de la probabilidad de una fuente de ignición efectiva

| Tipo de zona | Probable en funcionamiento normal | Posible en caso de disfuncionamiento previsible | Posible en caso de disfuncionamiento raro | Improbable en caso de disfuncionamiento raro |
|--------------|-----------------------------------|---|---|--|
| 0 | Frecuente | Probable | Ocasional | Remoto |
| 1 | Probable | Ocasional | Remoto | Improbable |
| 2 | Ocasional | Remoto | Improbable | Improbable |

La clasificación de la Tabla 3 corresponde a los siguientes descriptores:

- A: implica un nivel de riesgo alto, siendo necesario adoptar medidas adicionales para la eliminación o mitigación del riesgo de forma inmediata.
- B: implica un nivel de riesgo medio, siendo necesario adoptar medidas adicionales para la eliminación o mitigación del riesgo dentro de un corto periodo de tiempo. Si no es posible aplicar medidas técnicas es posible adoptar medidas organizativas con revisión periódica.
- C: implica un nivel de riesgo bajo, aunque es conveniente tomar medidas para minimizar el riesgo.
- D: implica un nivel de riesgo despreciable y no es necesaria la aplicación de medidas adicionales.

Tabla 3: Evaluación del nivel del riesgo

| Probabilidad | Consecuencias | | | |
|--------------|---------------|-------|-------|--------------|
| | Catastrófico | Mayor | Menor | Despreciable |
| Frecuente | A | A | A | C |
| Probable | A | A | B | C |
| Ocasional | A | B | C | D |
| Remoto | A | C | C | D |
| Improbable | B | C | C | D |

7. Ejemplo numérico de un nodo del proceso

En este apartado se muestra un ejemplo numérico del proceso descrito. Se trata de un nodo del proceso correspondiente a una bomba, que trasiega una mezcla de productos inflamables, siendo el hexano la sustancia más significativa por poseer el menor punto de inflamación y límite de inflamabilidad (ver características del hexano en la Tabla 4). El edificio donde se ubica dispone de una ventilación Muy Buena, dado que la parte interna cuenta con un sistema de renovación de aire, considerándose un factor de eficacia de la ventilación $f = 4$ y una velocidad del viento de $0,02 \text{ m/s}$.

Se han establecido los siguientes valores que definen las características del escape:

- La profundidad del charco h_m es de $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, por tratarse de un suelo no poroso, según la UNE 202007 IN.
- El tiempo de intervención es de 300 s , puesto que existe presencia continua de operarios en la planta, aunque los equipos no disponen de sistema de contención.
- El coeficiente de descarga es de $0,8$, puesto que se evalúan orificios de rotura, junta no selladas, etc., es decir aperturas irregulares, no definidas, de acuerdo al apartado B.7.2.1 de la IEC 60079-10-1.
- La presión hidrostática del charco es la de escape, es decir, la temperatura de trabajo de las bombas, conducciones o equipos. Se asume una presión de 3 bar (401.325 Pa), que es la más desfavorable.
- La superficie del charco (S) se ha obtenido de acuerdo a la Tabla B.1 de la IEC 60079-10-1, según la cual para elementos de sellado en partes móviles a gran velocidad la superficie de charco más desfavorable a la cual un escape puede expandirse es de 5 mm^2 .

Tabla 4: Propiedades del hexano

| HEXANO | | | |
|---------------------------------|-----------|-------|-------------------|
| Masa molar | M | 86 | kg/kmol |
| Temperatura operación | T | 293 | °K |
| Presión de vapor | p_v | 19000 | Pa |
| Límite inferior de explosividad | LIE | 1,20 | % |
| Velocidad del viento | v_w | 0,02 | m/s |
| Densidad del líquido | ρ_l | 665 | kg/m ³ |
| Densidad del gas | ρ_g | 3,58 | kg/m ³ |
| Índice de expansión adiabática | c_p/c_v | 1,08 | |

En primer término se obtienen los valores Q_t y Q_{gs} a partir de las expresiones (4) y (5):

$$Q_t = C_d \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p} = 0,8 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{2 \cdot 665 \cdot (401325 - 101325)} = 0,0799 \text{ kg/s} \quad (7)$$

$$Q_{gs} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{v_w}{f} \cdot \frac{M \cdot p_a}{R \cdot T} \cdot \ln\left(\frac{p_a}{p_a - p_v}\right) = 2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,02}{4} \cdot \frac{86 \cdot 101325}{8314 \cdot 293} \cdot \ln\left(\frac{101325}{101325 - 19000}\right) = 7,43 \cdot 10^{-6} \text{ kg/(s} \cdot \text{m}^2) \quad (8)$$

Con los valores obtenidos en (7) y (8) se sustituye en las expresiones (2) y (3) para determinar el área del charco formada como consecuencia de un escape, utilizándose el mayor de los valores obtenidos para el cálculo del radio equivalente del charco.

$$A_1 = \frac{V_t \cdot t_p}{h_m} = \frac{\left(\frac{Q_t}{\rho}\right) \cdot t_p}{h_m} = \frac{\left(\frac{0,0799}{665}\right) \cdot 300}{5 \cdot 10^{-3}} = 7,21 \text{ m}^2 \quad (9)$$

El valor de k_A se obtiene a partir del cociente de $Q_t/Q_{gs} = 10753,7 \text{ m}^2$; al ser mayor que 4 m^2 , el coeficiente $k_A = 1,4$.

$$A_2 = \frac{Q_t}{Q_{gs}} \cdot k_A = \frac{0,0799}{7,43 \cdot 10^{-6}} \cdot 1,4 = 15055,18 \text{ m}^2 \quad (10)$$

Como el valor de A_1 (9) es menor que el valor de A_2 (10) se tomará $A = A_1 = 7,21 \text{ m}^2$ y se calcula el radio equivalente:

$$r_{eq} = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{7,21}{\pi}} = 1,52 \text{ m} \quad (11)$$

Y junto a los datos de partida, se sustituyen los valores obtenidos en (9) y (11) en la expresión (1) se obtiene la tasa de escape:

$$Q_g = 2 \cdot 10^{-3} \cdot A \cdot \frac{v_w}{f} \cdot r_{eq}^{-0,11} \cdot \frac{M \cdot p_a}{R \cdot T} \cdot \ln\left(\frac{p_a}{p_a - p_v}\right) = 5,12 \cdot 10^{-5} \text{ kg/s} \quad (12)$$

A partir de este valor se determina mediante la ecuación (6) el característico de escape, obteniéndose un valor de $0,00238 \text{ m}^3/\text{s}$. Con este valor y con la velocidad del aire de $0,02 \text{ m/s}$, se obtiene en la Figura 2 un grado de dilución Medio para la sustancia liberada. Con un grado de escape secundario, un grado de dilución de la ventilación Medio y una disponibilidad de la ventilación Muy Buena, en la Figura 3 se obtiene una zona ATEX tipo 2.

Con el característico de escape y dado que se trata de una propagación horizontal por el suelo de un vapor pesado, se obtiene según la Figura 4 una zona de expansión de $1,5 \text{ m}$, quedando el nodo clasificado tal y como se muestra en la Figura 5.

Una vez clasificada la zona se determinan las posibles fuentes de ignición para la bomba (Tabla 5). Y a partir de los datos de las fuentes de ignición y que se trata de una zona ATEX tipo 2, se determina mediante la escala de la Tabla 3 la probabilidad de explosión. Con la probabilidad de explosión y las posibles consecuencias en caso de accidente de cada una de las secuencias, con la escala de la Tabla 4 se determina el riesgo potencial (Tabla 6). Según el nivel de riesgo se determinan las medidas correctoras o preventivas para el nodo de estudio.

Tabla 5. Identificación y caracterización de las fuentes de ignición para el nodo de estudio

| Id | Fuente de Ignición | Causas | Probabilidad de aparición de la fuente de ignición |
|-----|---|--|--|
| 1.1 | Chispas de origen mecánico | En caso de mal funcionamiento de los mecanismos rotativos de la instalación | Posible en caso de disfuncionamiento previsible |
| 1.2 | Material eléctrico | Posible uso de equipos o instalaciones eléctricas no acorde a la categoría exigida | Posible en caso de disfuncionamiento previsible |
| 1.3 | Electricidad estática: Descargas en chispa | Falta de continuidad de los elementos conductores (incluyendo el personal) | Posible en caso de disfuncionamiento raro |
| 1.4 | Electricidad estática: Descargas en brocha | Presencia de material aislante | Posible en caso de disfuncionamiento raro |
| 1.5 | Electricidad estática: Descargas en brocha propagante | Hoja o capa de material aislante con las dos superficies altamente cargadas | Posible en caso de disfuncionamiento raro |

8.- Conclusiones

El proceso de identificación, análisis, clasificación y evaluación de riesgos de zonas con riesgo de formación de atmósferas explosivas es un proceso complejo en el cuál intervienen muchos parámetros. Es conveniente para realizar un buen diseño de una planta industrial y de su proceso productivo desde el punto de vista de la seguridad industrial, analizar todas las variables que intervienen en la formación de atmósferas explosivas. Además, las operaciones de mantenimiento predictivas en las plantas industriales, así como la revisión periódica de los Documentos de Protección Contra Explosiones, reducen las probabilidades de formación de atmósferas ATEX y en definitiva, la probabilidad de que suceda un accidente, que en caso de producirse

puede tener unas consecuencias muy graves, tanto desde el punto de vista humano como desde el punto de vista económico.

Figura 5: Clasificación de zona ATEX del nodo de estudio

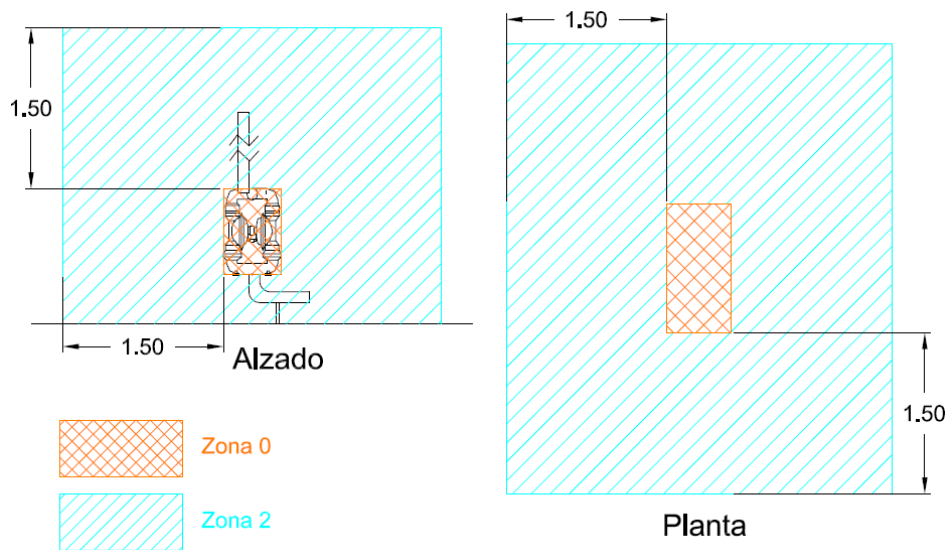


Tabla 6: Evaluación del nivel de riesgo para el nodo de estudio

| Id | Probabilidad de explosión | Consecuencia de explosión | Riesgo potencial | Medidas preventivas asociadas | Plazo de Implantación |
|-----|---------------------------|---------------------------|------------------|--|-----------------------|
| 1.1 | Remoto | Mayor | C | Procedimiento de inspección y mantenimiento de equipos eléctricos y mecánicos de acuerdo a la UNE-EN 60.079-17 | Máximo 6 meses |
| 1.2 | Remoto | Mayor | C | Verificación de los equipos instalados actualmente para comprobar su idoneidad Procedimiento de inspección y mantenimiento de equipos eléctricos y mecánicos de acuerdo a la UNE-EN 60.079-17 | Máximo 6 meses |
| 1.3 | Improbable | Mayor | C | Uso de calzado antiestático y disipativo en zonas de trabajo ATEX Todos los elementos conductores ubicados en zona clasificada deben estar conectados entre sí y a tierra, de manera que se evite el aislamiento Se debe comprobar la continuidad eléctrica entre mangas y elementos estructurales del filtro para evitar las descargas en chispa. | Inmediata |
| 1.4 | Improbable | Mayor | C | Se debe verificar que las mangas de los filtros son adecuadas a la Energía Mínima Ignición (EMI) de las sustancias Uso de calzado antiestático y disipativo en zonas de trabajo ATEX Todos los elementos conductores ubicados en zona clasificada deben estar conectados entre sí y a tierra, de manera que se evite el aislamiento | Máximo 6 meses |
| 1.5 | Improbable | Mayor | C | Se debe verificar que las mangas de los filtros son adecuadas a la Energía Mínima Ignición (EMI) de las sustancias Uso de calzado antiestático y disipativo en zonas de trabajo ATEX Todos los elementos conductores ubicados en zona clasificada deben estar conectados entre sí y a tierra, de manera que se evite el aislamiento | Máximo 6 meses |
| | | | | Se debe verificar que las mangas de los filtros son adecuadas a la Energía Mínima Ignición (EMI) de las sustancias | Máximo 6 meses |

9.- Referencias

- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2015). Norma IEC 60079-10-1 sobre Atmósferas explosivas. Parte 10-1: Clasificación de emplazamientos. Atmósferas de gas explosivas (2015).
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2016). Norma IEC 60079-10-2 sobre Atmósferas explosivas. Parte 10-2: Clasificación de emplazamientos. Atmósferas de polvo explosivas (2015).
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2006). Norma UNE 202007 IN: Guía de aplicación de la Norma UNE-EN 60079-10.
- España. (2003). Real Decreto 681/2003, de 12 de Junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo. Boletín Oficial del Estado, 18 de Junio de 2003, núm. 145, 23341-23345.
- García-Fayos, B., Piris-López, J., Arnal-Arnal, J.M & Sancho-Fernández, M. (2017). Estudio del documento de protección contra explosiones de una industria química dedicada a la fabricación de pinturas para cataforesis. En 21th International Congress on Project Management and Engineering, Cádiz, 12th-14th July, 1983-1994.
- Geng, J., Mure, S., Baldissone, G., Camuncoli, G. & Demichela, M. (2015). Human Error Probability Estimation in ATEX-HMI Area Classification: From THERP to FUZZY CREAM. Chem. Eng. Trans. 43, 1243–1248.
- Geng, J., Mure, S., Demichela, M. & Baldissone, G. (2020). ATEX-HOF Methodology: Innovation Driven by Human and Organizational Factors (HOF) in Explosive Atmosphere Risk Assessment. Safety 6, 5.
- Lisi, R., Milazzo, M. F. & Maschio, G. (2010). Risk Assessment of Explosive Atmospheres in workplaces. RT&A, 1, 23-31.
- RASE Project.(2000). Methodology for the Risk Assessment of Unit Operations and Equipment for use in Potentially Explosive Atmospheres.
- Unión Europea. (2000). Directiva 1999/92/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de Diciembre de 1999, relativa a las disposiciones mínimas para la mejora de la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas (2009). Diario Oficial de la Unión Europea, 28 de Enero de 2000, núm. L23, 57-64.
- Unión Europea. (2012). Directiva 2012/18/UE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de Julio de 2012, relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas y por la que se modifica y ulteriormente deroga la Directiva 96/82/CE. Diario Oficial de la Unión Europea, 24 de Julio de 2012, núm. 197, p. 1-37.
- Unión Europea. (2017).European Commission / JRC ScienceHub / MINERVA Portal [En línea]. Disponible en: <<https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/content>>. Acceso: Febrero 2020.

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

