

Depuration of gaseous emissions from the production of pentolite

Ixmit Lopez S., Viky C. Mujica F., María del Carmen Rodríguez de S.*

Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Abstract.-

This work studies the pollutants present in the gaseous emissions of a company producing pentolite, in order to quantify them and develop a proposal to adapt to environmental standards. Among the results, the immediate need to purify the gases due to the high concentration of TNT in the gases generated in the process (14453.1 mg/m^3), that established by the OSHA standards for nitroaromatic compounds (1.5 mg/m^3). To solve this problem, a gas extraction and purification system is designed, consisting of: four extractor hoods, one centrifugal fan and two bubble tanks in series. Its operation is based on the aspiration of the polluting gases through the extractor hoods; These flow forcefully from the fan through pipes to the bubbling tank. Using Fine's method, the degree of danger can be reduced from 1500 to 30 when installing the system, and it can be changed from a high-risk to a non-emergency condition in the working environment. The equipment selected, provide high efficiency, obtaining a concentration of trinitrotoluene in the gases emanating from the process of $1,445 \text{ mg/m}^3$ within the value established by OSHA.

Keywords: pentolite; trinitrotoluene; gas cleaning; occupational health.

Depuración de las emisiones gaseosas procedentes de la producción de pentolita

Resumen.-

Este trabajo, estudia los contaminantes presentes en las emisiones gaseosas de una empresa productora de pentolita, con el fin de cuantificarlos y desarrollar una propuesta para adecuarse a las normas ambientales. Entre los resultados, se destaca la necesidad inmediata de depurar los gases debido a la alta concentración de trinitrotolueno (TNT) en los gases generados en el proceso ($14453,1 \text{ mg/m}^3$), la establecida por las normas de la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) para compuestos nitroaromáticos ($1,5 \text{ mg/m}^3$). Para solucionar esta problemática se diseña un sistema de extracción y depuración de gases, conformado por: cuatro campanas extractoras, un ventilador centrífugo y dos tanques de burbujeo en serie. Su funcionamiento está basado en la aspiración de los gases contaminantes a través de las campanas extractoras; estos fluyen por fuerza del ventilador a través de tuberías hacia el tanque de burbujeo. Empleando el método de Fine se puede reducir el grado de peligrosidad de 1500 a 30 al instalar el sistema, logrando pasar de una condición de alto riesgo a una de no emergencia en el ambiente de trabajo. Los equipos seleccionados, proporcionan gran eficiencia, obteniendo una concentración de TNT en los gases emanados del proceso de $1,445 \text{ mg/m}^3$ dentro del valor establecido por la OSHA.

Palabras clave: pentolita; trinitrotolueno; depuración de gases; salud ocupacional.

Recibido: julio 2017

Aceptado: diciembre 2017

1. Introducción

El calentamiento global y el control de emanaciones tóxicas al ambiente son tópicos de gran interés debido a lo importante que es mantener el

* Autor para correspondencia

Correo-e: mcrc63@yahoo.com (María del Carmen Rodríguez de S.)

entorno de vida sano y limpio. Todos los procesos industriales donde se generan gases o vapor deben controlar sus emisiones antes de descargarlas al ambiente. Durante la producción de explosivos se obtienen residuos considerados como peligrosos por la EPA (Environmental Protection Agency), los riesgos potenciales de estos residuos para los ecosistemas y el hombre han creado la necesidad de buscar métodos efectivos y ambientalmente amigables que permitan la producción con el menor impacto [1, 2, 3].

Los explosivos son compuestos o mezclas de compuestos químicos que bajo la influencia de un choque químico o térmico, se descomponen rápidamente y de forma espontánea con la liberación de grandes cantidades de gas y calor [4].

Para la producción de artificios militares, se requiere pentolita como materia prima. La pentolita está compuesta por trinitrotolueno (TNT) y tetranitrato de pentaeritritol (pentrita); ambos compuestos orgánicos, de los cuales el TNT es el más contaminante de los dos. El TNT es un hidrocarburo aromático, explosivo primario e insoluble en agua [5]. Por otra parte, la pentrita es un detonante que no reacciona por movimiento brusco o la ignición a presión atmosférica normal, sino que es sensible a la fricción, las características recalcitrantes, xenobióticas y el riesgo para la salud del hombre y el ambiente que causa la contaminación por pentrita fue contemplado en el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP's) [6].

La presente investigación se realizó en una empresa venezolana cuya misión es atender el desarrollo de las industrias militares. La empresa tiene como objetivo la producción de materia prima para explosivos, así como también la fabricación y comercialización de armamentos, municiones, explosivos, químicos y otros materiales o equipos que interesen a los fines de la defensa nacional o que sean afines con su actividad industrial, manteniéndose el compromiso de obtener productos de excelente calidad.

El mezclado de materiales para producir la pentolita se realiza manualmente, por lo que los trabajadores están en contacto directo con los gases que se desprenden del proceso. A su vez,

la fundición del trinitrotolueno se realiza en un tanque cerrado con venteo en la parte superior, pero una vez que se envía a la tina de mezclado y comienza la unión con la pentrita, se generan gases que afectan el ambiente y a los trabajadores, debido a que no son tratados ni controlados en el proceso, y no se dispone de ningún sistema en la planta que extraiga los gases del lugar de trabajo.

Tomando en cuenta esta situación, en esta investigación se plantea la extracción de estos gases, pasando por una depuración previa, para así liberarlos al ambiente, produciendo menor impacto en los trabajadores y al medio ambiente, logrando así disminuir riesgos de contaminación ambiental y evitar enfermedades ocupacionales en los trabajadores.

2. Metodología

2.1. Caracterización de los gases emanados del proceso de pentolita

Se realizó con el fin conocer las sustancias y compuestos que posiblemente se desprenden durante la fabricación. La prueba experimental se realizó recolectando muestras a las condiciones normales de trabajo en la planta, manteniendo las condiciones estándar del proceso. El estudio de caracterización de los gases se llevó a cabo a través de las técnicas de cromatografía de gases y espectroscopia de masa, la primera sirve para obtener y confirmar a través de los espectros los componentes de las muestras analizadas y la segunda se utilizó para conocer los compuestos presentes en las muestras recolectadas.

Para conocer la concentración de las muestras analizadas por cromatografía de gases, se hace uso de la ecuación (1).

$$C_i = \frac{m_i - m_f}{V_s} 1000 \quad (1)$$

Donde:

- C_i : Concentración de la muestra (mg/m^3)
- m_i : Masa inicial de la muestra a fundir (g)
- m_f : Masa final de la muestra fundida (g)
- V_s : Volumen del lugar de trabajo (m^3)

2.2. Análisis de las condiciones de trabajo en planta

Para determinar el nivel permitido para las emanaciones tóxicas provenientes del proceso de pentolita, se emplea la hoja de seguridad de OSHA para el compuesto contaminante [7].

Actualmente, en Venezuela, el organismo encargado de velar por el bienestar de los trabajadores y el cumplimiento de las normativas establecidas por los entes gubernamentales es el Instituto Nacional de Prevención, Salud y Seguridad Laborales (INPSASEL); el cual fue creado según lo establecido en el artículo 12 de la Ley Orgánica de Prevención, Condiciones y Medio Ambiente de Trabajo, LOPCYMAT, publicada el 26 de Julio de 2005, en la Gaceta Oficial N° 38.236. El INPSASEL, es el encargado de realizar las inspecciones para la evaluación de los trabajadores y velar por sus mejores condiciones de trabajo, según lo establecido en la LOPCYMAT. Principalmente, los artículos 10 y 11 de la Ley, establecen las normas principales para prevenir enfermedades ocupacionales y proporcionar un adecuado ambiente de trabajo [8].

Existe una gran gama de métodos para evaluar condiciones de trabajo, pero según el estudio que se desee llevar a cabo, el método Fine es el más indicado porque se enfoca principalmente en las condiciones de trabajo de los operarios y sus posibles peligros a los que están sometidos respecto a emanaciones tóxicas provenientes del proceso donde se encuentren trabajando [9]. Otros toman principalmente riesgos ergonómicos y no es el punto de estudio a abordar en la presente investigación.

El método Fine es un método que se fundamenta en el cálculo del grado de peligrosidad de una actividad y permite establecer prioridades entre las distintas situaciones de riesgo en función del peligro causado. Tal sistema de prioridad está basado en la utilización de una fórmula simple para calcular el peligro en cada situación de riesgo y de este modo llegar a una acción correctora. Se lleva a cabo utilizando la ecuación (2) [10, 11].

$$G = C(E)P \quad (2)$$

Donde:

G: Grado de Peligrosidad

C: Consecuencias

E: Exposición

P: Probabilidad

Las consecuencias son los resultados más probables de un accidente debido al riesgo que se considera, incluyendo desgracias personales y daños materiales. La exposición, por su parte, se considera como la frecuencia con que se presenta la situación de riesgo; mientras que la probabilidad establece cuántas veces se puede presentar. Todos los valores para estos factores, se obtienen en un rango establecido por el método [10, 11].

2.3. Propuesta de alternativas de los sistemas tecnológicos

Se analizaron las variables involucradas en el proceso de extracción y depuración de gases, tales como velocidad de los gases, presión, temperatura, entre otras, en base a esto, se realizó un análisis técnico de la eficiencia evaluando las ventajas y desventajas de cada tecnología para garantizar así la reducción de la contaminación de estas emanaciones.

2.4. Selección de la tecnología para el sistema de extracción y depuración de gases

En primer lugar se emplea una matriz de selección donde se consideran criterios de seguridad y operatividad, para analizar las diferentes propuestas. En la matriz de selección desarrollada, se asignó una ponderación del 0-100 para cada criterio y del 0-5 para cada alternativa. Entre los criterios utilizados para la selección de la tecnología se tiene: eficiencia, costo de los equipos, ahorro energético, mantenimiento, servicios industriales y caída de presión.

La matriz de selección se realizó por separado, para cada equipo del sistema de extracción y depuración de gases. Así finalmente, se obtuvo el sistema más eficaz para la extracción y depuración de los gases emanados del sistema.

2.5. Diseño del sistema de extracción y depuración de los gases

Una vez seleccionada la tecnología para la extracción y depuración de los gases, se determina

la dimensión de los equipos. Este diseño se inició con la elaboración del diagrama de bloques del proceso, de allí se detallan las exigencias y equipos principales que posteriormente constituirían el sistema de extracción y depuración de gases. Luego, se desarrolló el diagrama de flujo del proceso, para determinar la dirección de las corrientes y los diferentes componentes que se tendrán circulando en el sistema a desarrollar. Las variables necesarias para el diseño del sistema, algunas se obtuvieron por análisis experimentales y otras por antecedentes, tales como velocidad del flujo de gas, presión, concentración, entre otras.

Es importante resaltar que fue necesario revisar las normas OSHA para compuestos nitroaromáticos [7], ya que de allí se obtuvo un criterio importante de diseño, tal como fue la concentración permitida de los contaminantes provenientes del proceso de pentolita, y así determinar las mejores condiciones de operación del sistema de extracción y depuración.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización de los gases emanados del proceso de pentolita

Una vez realizados los análisis del espectro de masa, se obtuvo que del proceso se desprende únicamente TNT; esto es posible porque en la producción de pentolita solo se funde el TNT, mientras que la pentrita se mantiene sólida en la mezcla, ya que el baño maría donde se lleva a cabo el proceso no se acerca a su temperatura de fusión. El otro compuesto que se obtiene en el espectro es la acetona, por ser el medio solvente de la muestra.

Al realizar la cromatografía de gases en 4 muestras recolectadas en la planta, se obtienen dos picos tal como se observa en la Figura 1; uno indica la acetona, y otro pico indicó la presencia de TNT empleando una muestra patrón de TNT disuelto en acetona.

Luego de conocer el compuesto contaminante que se desprende en la fabricación de pentolita, se procede a obtener su concentración. Ésta se determinó a partir del espacio físico del lugar de trabajo (120 m^3), ya que se debe obtener en función del volumen de aire donde se desprenden

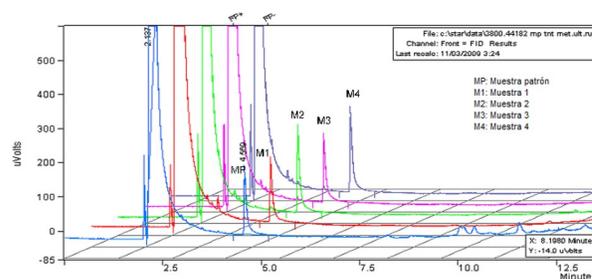


Figura 1: Cromatograma del patrón con las muestras 1, 2, 3 y 4.

los gases, como se establece en las normativas de la OSHA.

En el proceso que se lleva a cabo en planta, se utiliza una masa de 50 kg, mientras que las actividades experimentales se realizaron con una masa de 50 g. Para obtener la concentración de 50 kg de masa de pentolita, se utiliza una relación de 1g de pentolita en la concentración experimental por cada 1000 g de pentolita en la concentración del proceso en planta; se obtiene entonces una concentración promedio de $14453,1 \text{ mg/m}^3$.

3.2. Análisis de las condiciones de trabajo en planta

El nivel permitido para las emanaciones tóxicas provenientes del proceso de pentolita, se obtuvo a través de la hoja de seguridad de OSHA para el compuesto contaminante (TNT). Esta organización estableció que para una jornada de trabajo de 8 horas diarias y 40 horas semanales, debe existir una concentración máxima de $1,5 \text{ mg/m}^3$ [7].

El nivel de emanaciones máxima permitidas es superado por las condiciones actuales de trabajo, por lo que, se procede a realizar la evaluación de riesgos en un ambiente de trabajo a través del método matemático desarrollado por William T. Fine [10, 11].

Las medidas a tomar para mejoras, en caso que se necesiten, viene dado dependiendo del valor que se obtenga del grado de peligrosidad, como se muestra en la Tabla 1.

De acuerdo al cuadro de ponderación para cada criterio, se obtuvo el grado de peligrosidad tanto para la situación actual como para la situación con las condiciones más adecuadas de trabajo.

Tabla 1: Valoración de riesgos del método Fine.

Clasificación	Valoración
1. Consecuencia (C)	
Varias muertes	50
Muerte	25
Lesiones extremadamente graves (amputación, incapacidad permanente)	15
Lesiones con baja	5
Heridas leves, contusiones, golpes, pequeños daños	1
2. Exposición (E)	
Continuamente (o muchas veces al día).	10
Frecuentemente (aproximadamente una vez al día).	6
Ocasionalmente (de una vez por semana a una vez al día).	3
Raramente (se sabe que ocurre).	1
Remotamente posible (no se sabe que haya ocurrido).	0,5
3. Probabilidad (P)	
Es el resultado más probable y esperado si la situación de riesgo tiene lugar.	10
Es completamente posible, nada extraño, tiene una posibilidad del 50 %.	6
Sería una secuencia o coincidencia rara, 10 %.	3
Sería una coincidencia remotamente posible. Se sabe que ha ocurrido: 1 %.	1
Nunca ha sucedido en muchos años de exposición, pero concebible.	0,5
4. Grado de peligrosidad (G) = CEP	
Se requiere corrección inmediata. La actividad debe ser detenida hasta que el riesgo se haya disminuido.	≥ 200
Actuación urgente. Requiere atención lo antes posible.	$200 \geq GP \geq 85$
El riesgo debe ser eliminado sin demora, pero la situación no es una emergencia.	$85 <$

En la planta, existe una exposición continua a gases tóxicos provenientes del proceso de pentolita; la evaluación de la misma se observa en la Tabla 2, donde se muestran los valores obtenidos para cada criterio de evaluación.

Tabla 2: Ponderación utilizada para determinar el grado de peligrosidad en las condiciones actuales de planta.

Criterio	Característica	Ponderación
Consecuencia	Lesión grave	15
Exposición	Continua	10
Probabilidad	Alta	10

Para el criterio de consecuencia, se seleccionó un valor de 15, ya que puede haber una lesión grave, o desarrollar enfermedades ocupacionales como cáncer, con incapacidad permanente de trabajo. Respecto a la exposición, se seleccionó un valor de 10 ya que, como se dijo anteriormente, es continua debido a que ocurre en una jornada

de 8 horas de trabajo por 5 días a la semana. La probabilidad, obtuvo un valor de 10, debido a que es alta, por las condiciones de trabajo que se conocen y están presentes en todo momento.

Finalmente, al obtener el grado de peligrosidad, éste arroja un valor de 1500, lo que indica que se requiere una corrección inmediata del lugar de trabajo; por esto es conveniente y recomendable la instalación de un sistema de extracción y lavado de los gases del proceso.

Luego, para realizar el estudio de las condiciones más adecuadas de trabajo, se procede a evaluar el ambiente de trabajo tomando en cuenta que debería existir el sistema de extracción y lavado de gases. Esto conlleva a seleccionar otros valores para los criterios de evaluación, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Ponderación utilizada para determinar el grado de peligrosidad en las condiciones más adecuadas de trabajo en planta.

Criterio	Característica	Ponderación
Consecuencia	Lesión leve	5
Exposición	Frecuentemente	6
Probabilidad	Baja	1

En la consecuencia, por considerarse una lesión leve se ponderó con un valor de 5. La exposición sigue siendo continua de 8 horas diarias por 5 días a la semana a pesar que se reduce la concentración de gases emanados, por lo que se califica con un valor de 6. Finalmente se tiene una probabilidad de ser casi imposible según el método, ya que se asume una concentración mínima de agentes tóxicos en el ambiente de trabajo obteniendo el valor de uno. Así se obtiene un grado de peligrosidad de 30, lo cual indica que la situación no es una emergencia.

De esta manera, se observa entonces, que es necesario instalar un sistema de extracción y depuración de gases, ya que sería un beneficio para el proceso, mejorando las condiciones ambientales y otorgando un medio propicio de trabajo para los operarios del proceso.

3.3. Propuesta de alternativas de los sistemas tecnológicos actuales

Los sistemas tecnológicos que existen en la actualidad, ofrecen una gran cantidad de equipos y sistemas de gran eficiencia según los requerimientos necesarios del proceso que se esté estudiando. Para un sistema de extracción y depuración de gases, no se necesita una gran cantidad de equipos, pero los que se utilicen deben ofrecer gran efectividad para el proceso además de ser de fácil manejo, instalación y mantenimiento. Un sistema de extracción de gases, está formado básicamente por un ventilador extractor, conectado a un lavador de gases, tomando en cuenta las tuberías y accesorios necesarios para su instalación y unión, tal como se muestra en la Tabla 4. Estos equipos se estudian y seleccionan tomando en cuenta principalmente el flujo volumétrico de los gases contaminantes, su temperatura, espacio disponible para la instalación y la presión necesaria para el buen desenvolvimiento de los equipos.

Tabla 4: Propuestas tecnológicas consideradas.

Equipo	Propuesta tecnológica
Ventilador	Extractor centrífugo
Lavador de gases	Venturi
	Torre de relleno
	Tanque de burbujeo

Lavador de gases

1. *Tipo Venturi:* Es un lavador utilizado para limpiar aire, gases y vapores de varios contaminantes y partículas de polvo. Este tipo de lavador utiliza el diferencial entre la alta velocidad de los gases y el flujo libre de agua para crear gotas que atrapan a los contaminantes, los mantienen en suspensión y los liberan como un lecho de alta concentración. Es uno de los lavadores más usados, ya que se pueden usar como dispositivos de alta o baja energía; sin embargo, no son los más eficientes para una determinada potencia de contacto como otros equipos, pero su sencillez y flexibilidad favorecen

su función. El lavador Venturi maximiza la eficiencia de recolección de trazas, mientras que también minimiza costos de operación y mantenimiento por su simplicidad mecánica; sin embargo, presentan un alto consumo de energía, ya que necesita presurizar el gas para forzarlo a través del lavador [12].

2. *Torre de absorción con relleno:* Es una tecnología ampliamente utilizada para la recuperación de sustancias y compuestos presentes en los gases de emisión. También se utiliza para disolver componentes solubles de una mezcla gaseosa en un líquido; son recipientes cilíndricos verticales y en su interior poseen dispositivos como bandejas o lechos de relleno.

Por lo general, las fases líquida y gaseosa fluyen en contracorriente en el interior de la torre, y son los dispositivos internos, platos o rellenos, los que se encargan de promover el contacto entre las fases y así desarrollar la superficie interfacial a través de la cual se logra la transferencia de materia. Las torres de absorción con relleno son utilizadas para sistemas con materiales corrosivos y líquidos que forman espuma. A su vez, el relleno de la torre se escoge sobre la base de la resistencia a la corrosión, resistencia mecánica, capacidad para manejar los caudales requeridos, eficiencia en la transferencia de materia y costo.

El gas que contiene el soluto, o gas rico, entra en el espacio de distribución situado debajo del relleno y asciende a través de los intersticios del relleno en contracorriente con el flujo de líquidos. El relleno proporciona una gran área de contacto entre el líquido y el gas, que favorece un contacto íntimo entre las fases. El soluto contenido en el gas rico es absorbido por el líquido fresco que entra en la torre, y el gas diluido o agotado la abandona. El líquido se enriquece en soluto a medida que desciende y el líquido concentrado sale por el fondo de esta.

1. *Tanque de burbujeo:* Se conoce también como columna de burbujeo. Consiste en una columna parcialmente llena de líquido a través del cual se burbujea el gas. No se

suele utilizar a menos que el soluto tenga una solubilidad muy baja en el disolvente.

El hacer fluir un gas en forma de burbujas, indica que, mientras más pequeñas son las burbujas, habrá más área de transferencia de masa por unidad de volumen. En tanques pequeños, se utiliza un simple tubo para permitir la salida de las burbujas de gas hacia la superficie del líquido del tanque, mientras que en un tanque grande, se coloca un tubo en forma horizontal con pequeños orificios en el fondo de éste. Dichos orificios deben encontrarse a una distancia suficientemente grande, de tal manera, que las burbujas de dos orificios adyacentes no se unan en una sola burbuja.

El fin de burbujear un gas dentro de un líquido es para colocarlos en contacto, de modo que se lleve a cabo la transferencia de masa. Es importante tener presente que a mayor turbulencia, mayor transferencia de masa, lo que da una idea de la relación que guarda la eficiencia con la velocidad de las burbujas. Como es de esperarse, el ascenso de burbujas independientes es distinto al de las burbujas en enjambre o agrupadas, pues éstas se pueden juntar en una sola burbuja, disminuyendo entonces la relación área-volumen.

El tamaño que puedan tener las burbujas, depende directamente de la rapidez de flujo a través de los orificios, el diámetro de éstos, las propiedades del fluido y la extensión de la turbulencia que prevalece en el líquido.

3.4. Selección de la tecnología para el sistema de extracción y depuración de gases

A continuación, se realizó entonces la selección del equipo más adecuado a utilizar en el proceso, haciendo uso de la matriz de selección. Para el criterio de costo, se le otorgó un valor de 25 puntos; para el mantenimiento y caída de presión se le dió un valor de 20 puntos; para el criterio de eficiencia se le dió un puntaje de 15 puntos, y por último un puntaje de 10 al ahorro energético y a los servicios industriales.

Los aspectos más importantes a tomar en cuenta son el costo, mantenimiento y caída de presión. Los demás aspectos a evaluar son menos

importantes, pero son de igual manera necesarios para el estudio de selección. A su vez, se confirió una ponderación de 0 a 5 puntos para la evaluación de las tecnologías en cada criterio. De esta manera, con lo explicado anteriormente, se procede a realizar la matriz de selección, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5: Matriz de selección de la propuesta tecnológica a escoger para el sistema de extracción y depuración de gases.

Criterio	Valor	Ponderación tecnológica					
		(I)		(II)		(III)	
		Valor	Puntos	Valor	Puntos	Valor	Puntos
Costo	25	3	75	2	50	4	100
Mantenimiento	20	2	40	4	80	3	60
Caída de presión	20	2	40	3	60	3	60
Eficiencia	15	2	30	3	45	4	60
Ahorro energético	10	2	20	3	30	3	30
Servicios industriales	10	3	30	4	30	4	40
Total	100	-	235	-	295	-	350

(I): Lavador Venturi
(II): Torre de absorción
(III): Tanque de burbujeo

Al evaluar las tecnologías en la matriz de selección, el tanque de burbujeo resultó ser el equipo más adecuado para colocar y utilizar en el sistema de extracción y depuración de gases del proceso con un puntaje final de 350; la decisión se tomó una vez determinado que este sistema es el que proporciona las mejores condiciones, especificaciones y características requeridas para el proceso, lo que conlleva a un buen desempeño y disminución en el impacto ambiental y bienestar de salud para los trabajadores en un futuro.

Como el gas a extraer es una sustancia explosiva, el ventilador a utilizar es de tipo centrífugo, elaborado con acero inoxidable en la carcasa y fibra de vidrio en el motor y las aspas. Esta medida es necesaria para disminuir riesgos de explosividad y accidentes. De esta manera, la selección se realiza para los lavadores de gases.

3.5. Diseño del sistema de extracción y depuración de los gases

La concentración de los gases emanados, presentó un valor bastante desviado y elevado del

establecido por el reglamento de la OSHA, ya que se obtuvo una concentración de $14453,1 \text{ mg/m}^3$, y la máxima recomendada es de $1,5 \text{ mg/m}^3$. Partiendo de allí, se realizó el diagrama de bloques y de flujo del sistema.

Básicamente, los diagramas indican la dirección que lleva el flujo de gas desde el proceso de fundición, que es donde se generan, hasta el lavador de gases donde son depurados y liberados al ambiente una vez eliminada su contaminación. Esto se muestra en la Figura 2.

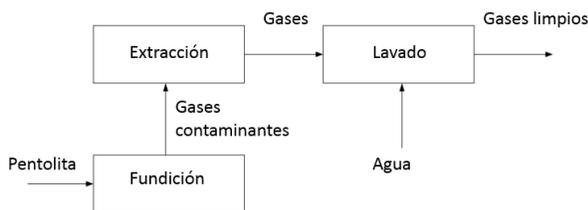


Figura 2: Diagrama de bloques del proceso de extracción y depuración de gases para el proceso de producción de pentolita.

El funcionamiento del lavador de gases consiste en hacer burbujear el gas proveniente del ventilador, dentro del tanque lavador donde se encuentra agua estancada; el gas al tocar el agua se deposita en el fondo del tanque para ser retirado una vez que se descargue el mismo. Este líquido y el sólido depositado se liberan hacia una tanquilla por un ducto, donde se encargan de recogerlo y disponerlo como desecho peligroso, tomando en cuenta las normas y requisitos necesarios para su manejo y posterior desecho.

Los equipos a utilizar en el sistema seleccionado y mostrados en la Figura 3, se describen a continuación:

- Campana extractora: Tuberías dispuestas en la salida de los tanques de fundición para conducir los gases hacia el ducto de transporte para el ventilador extractor. La altura de la campana se determinó utilizando la ecuación (3):

$$h = \frac{1}{3} D_c \tan(\alpha) \quad (3)$$

Donde:

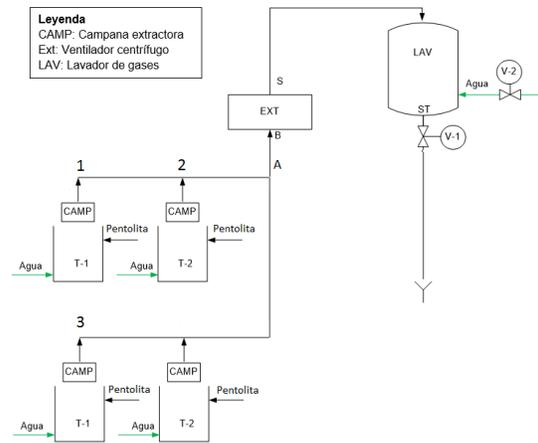


Figura 3: Diagrama de flujo del proceso de extracción y depuración de gases para el proceso de producción de pentolita.

α = Ángulo de la campana extractora (rad)

D_c = Diámetro de la campana (m)

h = Altura de la campana (m)

Se utiliza el mismo diámetro de tanque del proceso para dimensionar la campana.

- Ventilador extractor: está dispuesto en forma vertical en el techo del galpón por la parte exterior de éste. Tiene como función principal extraer los gases desalojados en el proceso de producción de pentolita. De allí debe conducirlos a través de la campana extractora hasta enviarlos al lavador de gases. Su dimensionamiento se lleva a cabo conociendo su potencia, utilizando la ecuación (4):

$$P_V = Q \Delta P_{TV} \quad (4)$$

Donde:

P_V : Potencia otorgada por el ventilador (W)

Q : Caudal volumétrico del gas (m^3/s)

ΔP_{TV} : Diferencia de presión total a entregar por el ventilador (N/m^2)

Otra característica importante a conocer del ventilador es la eficiencia, la cual viene determinada por la siguiente ecuación:

$$n_V = \frac{Q \Delta P_{TV}}{P_{IV}} \quad (5)$$

Donde:

n_V : Eficiencia del ventilador (adim)

P_{IV} : Potencia ideal del ventilador (W)

En el dimensionamiento del ventilador extractor, se trazó como parámetro de diseño el caudal de operación, el cual es el proveniente del sistema de extracción de la campana. Este equipo debe ser de fibra de vidrio en las aspas, y la carcasa de acero inoxidable. El material de las aspas se debe a riesgos de explosión ya que los gases presentan alto nivel de explosividad, y al ser las aspas de fibra de vidrio, se evita algún posible cortocircuito en el equipo y así un accidente posterior. Luego de realizar los cálculos se tiene una eficiencia del 40 %, el ventilador está diseñado, según el fabricante, para un rango de caudales desde 500 hasta 10000 pie^3/min , y en este proceso de trabaja con un caudal aproximado de 1600 pie^3/min .

- Lavador de gases: dispuesto en forma vertical; su función principal es lavar el gas proveniente del extractor haciéndolo burbujear por una tubería que entra por el tope del lavador. Los gases son burbujeados a un nivel del 25 % de la altura del tanque donde, por un proceso de sublimación inversa, se depositan en el fondo del tanque al entrar en contacto con el agua por su baja solubilidad. Luego, lo que no cambia de estado, escapa al ambiente. La deposición ocurre por enfriamiento del gas en el agua, además de que la sustancia burbujeante no es soluble en el agua.

Para dimensionar el tanque, es importante tomar en cuenta la relación de diseño que establece la ecuación (6):

$$D_t = \frac{1}{6} A_t \quad (6)$$

Donde:

D_t : Diámetro del tanque de burbujeo (m)

A_t : Altura del tanque de burbujeo (m)

La tubería que entra al tanque, por la cual se burbujan los gases provenientes del sistema, presenta un diámetro de 10", por lo que se establece entonces que el diámetro del tanque de burbujeo será de 16".

El lavador está cerrado al ambiente, pero se encuentra a presión atmosférica, ya que presenta

una pequeña chimenea en el tope donde se escapan los gases que no se depositan en el tanque. Según sus parámetros y condiciones de diseño, otorga una eficiencia entre 96 y 99 %, por lo que, la concentración de gases de TNT disminuye a un valor de 144,531 mg/m^3 ; éste aún indica un número superior a la concentración establecida por OSHA. Para obtener que las emanaciones se encuentren dentro del valor requerido, es necesario la instalación de otro tanque de burbujeo dispuesto en serie con el primero logrando así disminuir la concentración de los gases hasta un valor de 1,445 mg/m^3 . Éste último cumple con la normativa ambiental vigente.

Para la distribución en planta de los equipos del sistema de extracción y depuración de gases, se tomaron las medidas de la estructura física directamente en el galpón donde se encuentran las instalaciones de la planta, considerando los espacios disponibles, áreas de desempeño de los trabajadores, facilidades de manejo de los equipos y desarrollo del proceso ya que el mismo se realiza de forma manual. Se tomaron en cuenta consideraciones de tipo ergonómicas al momento de determinar los espacios disponibles para la posterior instalación del sistema en estudio.

Las campanas extractoras junto al sistema de tuberías que llevan al ventilador, se colocan dentro del galpón. Los demás equipos como el extractor y el lavador de gases, junto a sus tuberías, se colocan en el techo del mismo. La descarga del tanque de burbujeo se realiza por una tubería que lleva estos desechos hasta la alcantarilla que se encuentra en el nivel de planta baja de este proceso.

Como en el proceso se tienen cuatro (4) tanques de fundido de pentolita, en el diseño del sistema se deben tomar en cuenta cuatro (4) campanas de extracción, una sobre cada tanque. De esta manera, las cuatro tuberías, provenientes de cada campana, se unen en un punto donde se forma un solo ducto hacia el ventilador. Es necesario que en este punto de unión, las pérdidas de presión sean las mismas para obtener un equilibrio en el sistema y así el buen funcionamiento del mismo.

Respecto a la distribución de los servicios industriales, las instalaciones ya están en planta, para abastecer la sección de la planta que allí

funciona; sólo se necesita alargar las tuberías de agua hacia el techo del galpón para realizar el llenado del tanque de burbujeo cuando sea necesario.

4. Conclusiones

La concentración de trinitrotolueno en el ambiente de trabajo ($14.453,1 \text{ mg/m}^3$) es superior a la establecida por normativas de salud de la OSHA ($1,5 \text{ mg/m}^3$), por lo que la instalación de un sistema de extracción y depuración de gases es de gran importancia en el proceso según los resultados de la aplicación del método Fine, debido a que los trabajadores y el medio ambiente están en riesgo de enfermedades y contaminación, respectivamente.

El ventilador extractor centrífugo es el más indicado para la extracción de los gases generados en el proceso en combinación con un tanque de burbujeo, por ser el equipo más eficiente por su diseño para la remoción de los gases contaminantes del proceso de fabricación de pentolita.

Empleando el método de Fine se determinó que se puede reducir el grado de peligrosidad de 1500 a 30 al instalar un sistema que permita reducir los contaminantes en las emanaciones gaseosas del ambiente de trabajo. Pasando así de una condición que amerita corrección inmediata a una situación de no emergencia en el ambiente de trabajo.

Para dar cumplimiento a la normativa ambiental se requiere instalar dos tanques de burbujeo dispuestos en serie, obteniendo una concentración de trinitrotolueno en los gases emanados del proceso de $1,445 \text{ mg/m}^3$ logrando que el valor se encuentre en el dispuesto por la OSHA (máximo $1,5 \text{ mg/m}^3$).

Referencias

- [1] James E. Brannon, Donald D. Adrian, Judith C. Pennington, and Tommy E. Myers. Slow release of PCB, TNT, and RDX from soils and sediments. Technical report EL-92-38, Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg MS Environmental Lab, Vicksburg, Mississippi, 1992.
- [2] James M. Brannon and Judith C. Pennington. Environmental fate and transport process descriptors for explosives. Technical report ERDC/EL TR-02-10, U.S. Army Engineer Research and Development, Vicksburg, Mississippi, 2002.
- [3] Ibis Cruz-Virosa, Juan José-Cabello-Eras, Luis Sorinas-González, Ana del Rosario Varela-Haro y Inocente Costa-Pérez. Propuesta de procedimiento para el control de emisiones atmosféricas en ambientes urbanos. *Ingeniería Industrial*, 36(1):2–16, 2015.
- [4] Francisco Carmona Pastor. *Transporte de mercancías peligrosas: explosivos*. Ediciones Díaz de Santos, S. A., España, 1 edición, 2002.
- [5] Instituto Nacional de Normalización. Sustancias peligrosas clase 1: Explosivos- medidas de seguridad en la inutilización y destrucción de explosivos de uso industrial. Norma Chilena (NCh-386-2004), 2004.
- [6] Yerson Durán y Christian Andrade. Biodegradación del explosivo tetranitrato de pentaeritritol (petn) por bacterias aisladas de ambientes mineros. *Revista Peruana de Biología*, 20(2):145–150, 2013.
- [7] United States Department of Labor. Chemical sampling information. 2,4,6-Trinitrotolueno. goo.gl/Bp4Goh Consulta: 2017, Abril 18.
- [8] Asamblea Nacional de la República Bolivariana de Venezuela. Ley orgánica de prevención, condiciones y medio ambiente de trabajo. *Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela*, (38.236):340.524–340.542, julio 2005.
- [9] Emilio Castejón Vilella. La evaluación de riesgos: una reflexión. *Salud y Trabajo*, (111-112):4–10, 1995.
- [10] William T Fine. Mathematical evaluations for controlling hazards. Technical report, Naval Ordnance Lab White Oak MD, Maryland, 1971.
- [11] Juan Carlos Rubio Romero, editor. *Manual para la formación de nivel superior en prevención de riesgos laborales*. Ediciones Díaz de Santos, España, 2005.
- [12] Carmen Orozco Barrenetxea, Antonio Pérez Serrano, María Nieves González Delgado, José Marcos Alfayate Blanco y Francisco J. Rodríguez Vidal. *Contaminación ambiental: Una visión desde la química*. Paraninfo, 2003.