

# Propuesta de un sistema de control de emisiones atmosféricas para el proceso de fabricación de moldeados de poliuretano

Angelina Correia<sup>\*,a</sup>, Oscar Bertiz<sup>b</sup>, María Cristina Colmenares<sup>a</sup>, Cristina De Sousa<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Centro de Investigaciones Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIAUC)

<sup>b</sup>Escuela de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo.

---

## Resumen.-

La investigación presenta una propuesta para el control de las emisiones atmosféricas del proceso de moldeados de espumas de poliuretano para la manufactura de apoya cabezas de butacas de automóviles. La metodología se inició con el diagnóstico del proceso, luego se analizó la reacción de polimerización y se caracterizó la corriente gaseosa, para posteriormente presentar propuestas de control de emisiones. Entre las principales conclusiones se tiene que la formulación presenta 5 % de exceso de diisocianato de tolueno y las emisiones de compuestos orgánicos volátiles tienen concentración promedio de 1,36 ppm y velocidad másica de 0,96 Kg/h, encontrándose únicamente tolueno y heptano. Esto implica que las emisiones están por debajo de los límites establecidos en la legislación sobre la calidad del aire, sin embargo, se están utilizando sistemas de dispersión de contaminantes como único método de control de emisiones, por lo que se propone la introducción de filtros de adsorción.

**Palabras clave:** Poliuretano, espumas flexibles, emisiones, compuestos orgánicos volátiles, filtros de adsorción.

## Proposal of an atmospheric emission control system for the manufacturing process of molded polyurethane parts

### Abstract.-

The research presents a proposal for controlling the atmospheric emissions of the molded polyurethane parts manufacturing process that is used in the manufacturing of automobile head rests. The methodology began with the process diagnosis, then the polymerization reaction was analyzed and the gas stream was characterized, and finally several emission control proposals were presented. The main conclusions are: The formulation exhibits 5 % excess of toluene diisocyanate, the emissions of volatile organic compounds have average concentration of 1.36 ppm and the mass velocity 0,96 kg/h, founding toluene and heptanes only. This imply that the emissions are below the limits established in the air quality legal regulations; however, they are using contaminant dispersion systems as the only method for controlling the emissions, therefore it was propose the inclusion of adsorption filters. Key words: Polyurethane, flexible foams, emissions, volatile organic compounds, adsorption filters.

**Keywords:** Polyurethane, flexible foams, emissions, volatile organic compounds, adsorption filters.

Recibido: 20 diciembre 2009

Aceptado: 18 octubre 2010

## 1. INTRODUCCIÓN

El proceso a analizar es la fabricación de moldeados de espumas a base de poliuretanos para los apoya cabeza de las butacas de automóviles de las principales ensambladoras a nivel nacional, entre ellas Ford, General Motor y Toyota de Venezuela, los cuales están constituidas de células abiertas que son permeables al aire con alta

---

\*Autor para correspondencia

Correos-e: [acorreia@uc.edu.ve](mailto:acorreia@uc.edu.ve) (Angelina Correia),  
[mcolmena@uc.edu.ve](mailto:mcolmena@uc.edu.ve) (María Cristina Colmenares)

resistencia al impacto y excelente aislamiento eléctrico [1].

Los poliuretanos se obtienen a través de la reacción entre un diol y un diisocianato, para formar enlaces tipo uretano. Además de estas materias primas principales, se añaden aditivos que ayudan a mejorar sus propiedades físicas y químicas, tales como: agentes de entrecruzamiento, catalizadores, surfactantes y ceras. Particularmente, en el proceso de fabricación de las espumas, el polímero formado se debe expandir y el gas de espumación se genera "in situ" a través de la reacción entre el diisocianato de tolueno y el agua [2].

La problemática dentro de este proceso se debe a la falta de control de las emisiones atmosféricas de los diferentes compuestos volátiles que son utilizados como materias primas y/o de aquellos que se generan producto de las distintas etapas de polimerización, expansión, curado y desmolde. Adicionalmente la empresa no conoce la composición cualitativa ni cuantitativa de la corriente de salida, por lo que se hace necesario un estudio teórico y estequiométrico de la reacción de polimerización y un posterior análisis de la corriente gaseosa y de esta forma establecer si la planta cumple con la normativa ambiental relacionada con la calidad del aire y el control de la contaminación atmosférica [3].

La canalización de los gases emitidos durante el proceso se hace utilizando una chimenea con un extractor de tiro inducido colocado en la salida del ducto. No obstante, el desconocimiento de la composición de la corriente gaseosa limita la capacidad de respuesta porque no se puede proponer un sistema de control de las emisiones gaseosas si se desconoce la magnitud del problema. Por otra parte, con este trabajo se busca contribuir con la implantación de un Sistema de Gestión Ambiental ISO 14001 en la empresa en estudio, la cual ya cuenta con una certificación de calidad asociada a la industria automotriz (ISO PF 16949), y de esta manera complementar su competitividad en el mercado de autopartes a nivel nacional con una gestión que contribuya a la preservación del ambiente.

## 2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la investigación se realizaron las siguientes etapas:

### 2.1. Diagnóstico del proceso de fabricación de moldeados de poliuretano

Se realizaron visitas al área de producción a fin de conocer el proceso y las variables involucradas en la manufactura del poliuretano. Adicionalmente se revisaron las hojas de seguridad (MSDS) de los componentes involucrados en la reacción de polimerización, así como de los productos, para conocer sus características físicas y ecotóxicas.

### 2.2. Análisis de la reacción de polimerización

Se realizó un estudio teórico de la reacción de polimerización ya que la empresa no disponía de dicha información y por otra parte, se determinaron los excesos de materias primas para un batch dentro de la línea de producción, a fin de optimizar el uso de los recursos (materia prima, energía, agua y tiempo). Esto se efectuó a partir del balance estequiométrico de la reacción, para lo cual se calcularon los equivalentes de todos los reactivos que son fuentes activas de grupos hidroxilos (OH), provenientes de polioles y otros compuestos (dietanolamina y agua), que son capaces de reaccionar con diisocianato de tolueno (TDI). Para determinar los equivalentes se divide la cantidad (gramos) de cada componente entre su peso equivalente [4].

- Peso equivalente de fuentes activas de OH ( $PE_{OH}$ ): Se reporta como el número de miligramos de hidróxido de potasio equivalentes a los grupos de hidroxilos encontrados en una muestra, tal como lo indica la siguiente ecuación

$$PE_{OH} = \frac{PM_{KOH} * Fc}{N_oOH_p} \quad (1)$$

donde:

$PM_{KOH}$ : Peso molecular de KOH, (g/gmol)

$N_oOH_p$ : Número de Hidróxido, (mgKOH/eqOH), suministrado por el proveedor (33 polioli base y 22 polioli polimérico)

$Fc$ : Factor de conversión, (1000mg KOH/1g KOH).

- Equivalentes de isocianato: Primero se determina el peso equivalente ( $PE_{ISO}$ ) (ecuación 2) y luego los equivalentes ( $E_{ISO}$ ) (ecuación 3)

$$PE_{ISO} = \frac{PM_{(NCO)} * Fc}{\%NCO} \quad (2)$$

donde:

$PM_{(NCO)}$ : Peso molecular del grupo  $NCO$ , (g/gmol).

$\%NCO$ : Porcentaje de  $NCO$  (dato del proveedor).

$Fc$ : Factor de conversión, 100.

$$E_{ISO} = \frac{(\sum E_{OH}) * Ind_{ISO}}{Fc} \quad (3)$$

donde:

$\sum E_{OH}$ : Sumatoria de los equivalentes de  $OH$ , (eq)

$Ind_{ISO}$ : 110 (suministrado por el proveedor).

$Fc$ : Factor de conversión, (100)

### 3. CARACTERIZACIÓN DE LA CORRIENTE GASEOSA

- Selección del sitio de muestreo: La chimenea no contaba con las facilidades para permitir el muestreo de las emisiones según lo establecido en la Norma COVENIN 1649 [5], debido a ello se realizaron los cálculos según el diámetro interno de la chimenea (0,63m) y se determinaron dos puntos de muestreos (uno perpendicular al otro) bajo condiciones mínimas (1,26m desde la parte inferior de la chimenea en dirección del flujo). La empresa llevo a cabo la colocación de los niples, pero no disponía de la infraestructura necesaria para la toma de la muestra en los puntos muestreos determinados por lo que por razones de seguridad no se pudo efectuar. Es por ello que el muestreo se realizó en la parte inferior del ducto y aún cuando no se siguió rigurosamente la normativa COVENIN 1649, el análisis sirve como referencia ya que los vapores de los compuestos utilizados para la manufactura de la espuma y los generados durante la misma, son canalizados a través del ducto por acción del extractor de tiro inducido, el cual no presenta entradas posteriores de flujo adicionales.

- Toma de muestras: se realizó mediante una sonda (colocada en el punto centroide del ducto),

válvula reguladora de flujo, bomba impulsora y mangueras de conexión conectados a un cartucho de carbón activado especialmente utilizada en la recolección de muestras de compuestos orgánicos volátiles, según lo establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) [6]. Se realizaron 4 tomas de 2 horas cada una, que representa el tiempo necesario para producir bacth completo, a una temperatura de 36°C y 726 mm Hg.

- Análisis: La determinación de los compuestos orgánicos gaseosos (COV) se realizó por cromatografía, tal como lo señala la normativa COVENIN 3513 [7]. La muestra recolectada, luego de su desorción, es inyectada en un equipo de cromatografía de gases (columna capilar elaborada de oxido de silicio, de 30,00 × 0,53 mm.) equipado con un detector de ionización a la llama (FID). Al equipo también se inyectaron los siguientes patrones: benceno, tolueno, xileno, alcohol metílico, alcohol etílico, alcohol isopropílico, alcohol butílico, heptano y etil benceno. La velocidad másica se obtiene multiplicando la concentración de los COV por el caudal de extracción del aire de la chimenea. Este último valor se estimó determinando la velocidad de la corriente gaseosa (0,63m/s) y el área del ducto de la chimenea (0,312m<sup>2</sup>) [8].

### 4. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS PARA CONTROLAR LAS EMISIONES GASEOSAS

Se realizó una recopilación de las tecnologías utilizadas para el control de las emisiones atmosféricas, así como también se verificó su existencia de proveedores en el país o la posibilidad de disponer de los equipos necesarios para su implementación. Posteriormente se elaboró un cuadro comparativo donde se presentan las ventajas y desventajas que pueden estar asociadas a cada una, con la finalidad de elaborar una matriz como un instrumento de selección, asignándose una puntuación que va del cero (0) al cinco (5) a cada una de las propuesta, tomando el valor 0 como la situación menos favorable y el valor 5 como la más favorable. La alternativa seleccionada fue aquella

que obtuvo la puntuación más alta resultante del producto entre el porcentaje del criterio utilizado y su valoración.

## 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1. Proceso de fabricación de moldeados de poliuretano

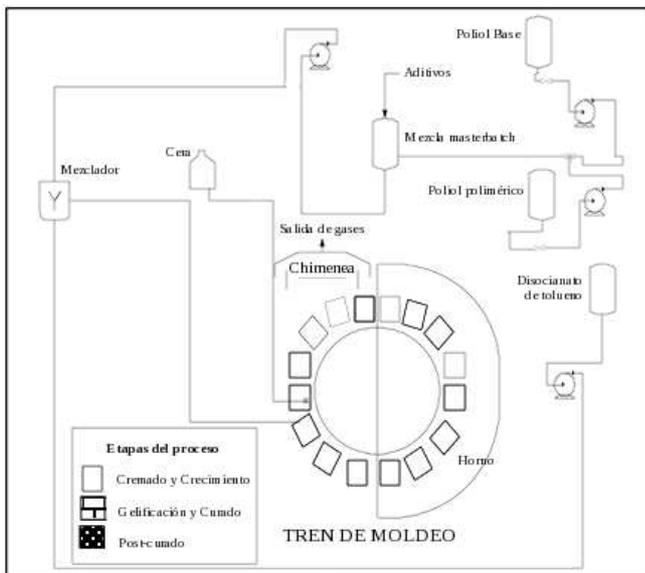


Figura 1: Diagrama del proceso de fabricación de moldeados de poliuretano.

Las materias primas principales en el proceso son el diisocianato de tolueno (TDI) y los poliols. El TDI, es una mezcla de isómeros 2,4 y 2,6 en una proporción 80/20. Por su parte, además del polioli base, se añade también un polioli polimérico (proporción base/polimérico: 65/35), de mayor peso molecular y funcionalidad que permite la obtención de espumas con mayor rigidez y estabilidad durante el moldeo y mejores características de durabilidad. En cuanto a los aditivos, se añaden aminas (dietanolamina) con funcionalidad mayor de 2 que sirven como agentes de entrecruzamiento [9], catalizadores (aminas terciarias) y surfactantes. A fin de poder retirar las piezas sin daño alguno del molde, éstos se rocían con una cera (resina antiadherente) a través de pistolas aerográficas. El proceso de fabricación de moldes de espumas de poliuretano se representa en la Figura 1.

En principio las materia primas: diisocianato de tolueno, polioli base y polioli polimérico, se almacenan en tres (3) tanques por separado y posteriormente son alimentados al proceso mediante un sistema de bombeo. Los poliols y los aditivos se mezclan en otro tanque (mezcla masterbatch) a una temperatura de 24 °C, en constante agitación por un periodo de 45 minutos y luego se envía a la línea de producción para ser dosificado, junto con el TDI, al tren de moldeo y pasar posteriormente a un horno por carga que opera a una temperatura de 110 °C.

Los moldes trabajan a presión ambiente, ya que poseen agujeros ubicados en la tapa que permite la salida de gases generados durante la reacción. Los moldes del tren son reemplazables, y eso dependerá del tipo de apoya cabeza a fabricar según las especificaciones de las ensambladoras.

En el tren de moldeo ocurren tres etapas importantes. En principio, la etapa de cremado y crecimiento, donde en un periodo corto de tiempo se generan gases de expansión (dióxido de carbono) dándole a la mezcla una apariencia espumosa, período en el cual la temperatura aumenta debido a que la reacción química es exotérmica. Finalizado el proceso anterior comienza el de gelificación y curado donde la espuma comienza a sostenerse por si misma.

Luego continúa el proceso de post-curado en el horno donde el poliuretano es tratado a altas temperaturas por 5 minutos, para posteriormente ser desmoldados y transportado a las áreas de compresión, donde se retiran todos los gases que contienen los bloques para luego ser almacenado. La capacidad productiva del proceso es de 1200 moldeados por día con una masa promedio de 0,352 Kg cada uno, y la temperatura máxima alcanzada durante todo el proceso es de 120 °C.

## 6. Análisis de la reacción de polimerización

En la Figura 2 se representan las distintas reacciones involucradas en la formación de espumas de poliuretano. El TDI reacciona con el polioli (Figura 2, reacción a) formando el poliuretano lineal (con enlaces tipo uretano: -NHCOO-) y éste a su vez reacciona con el agente de entrecruzamiento

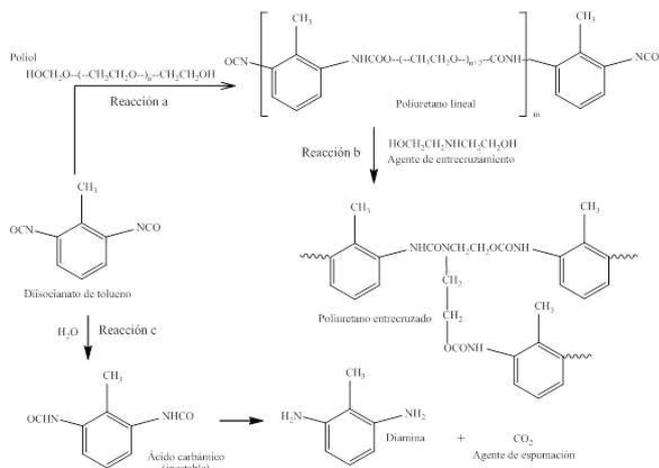


Figura 2: Reacciones involucradas en la fabricación de espumas moldeadas de poliuretano

(Figura 2, reacción b) para dar origen a un poliuretano entrecruzado mixto (con uniones tipo uretano:  $-NHCOO-$  y tipo poliurea disustituida:  $-NHCONRR-$ ) [10].

Una vez formado el poliuretano ocurre el proceso de expansión para formar la espuma, debido al desprendimiento del dióxido de carbono producto de la reacción entre el TDI sin reaccionar y el agua añadida a la reacción (Figura 2, reacción c).

La reacción isocianato/alcohol (reacción a) ocurre a una velocidad moderada y comparable a la velocidad de espumación, pero menor que la reacción de isocianato/amina, debido a esto son normalmente catalizada por bases, principalmente aminas terciarias, que promueven la etapa de gelificación [9].

No obstante, y según lo reporta Occhiello y Corti [10], parte del TDI puede también reaccionar con la diamina, producto de la reacción espumación (Figura 3, reacción d), formando una poliurea sustituida (enlaces  $-NHCONH-$ ); con el poliuretano para formar los enlaces alofanato (Figura 3, reacción e) y con las poliureas dando lugar a los enlaces biuret (Figura 3, reacción f).

Estas reacciones son reversibles y ocurren a temperaturas superiores a los  $120\text{ }^\circ\text{C}$  y son consideradas muy lentas cuando no se emplean catalizadores específicos y ocurren principalmente en la etapa de post-curado, cuando se somete durante largo tiempo a altas temperatura.

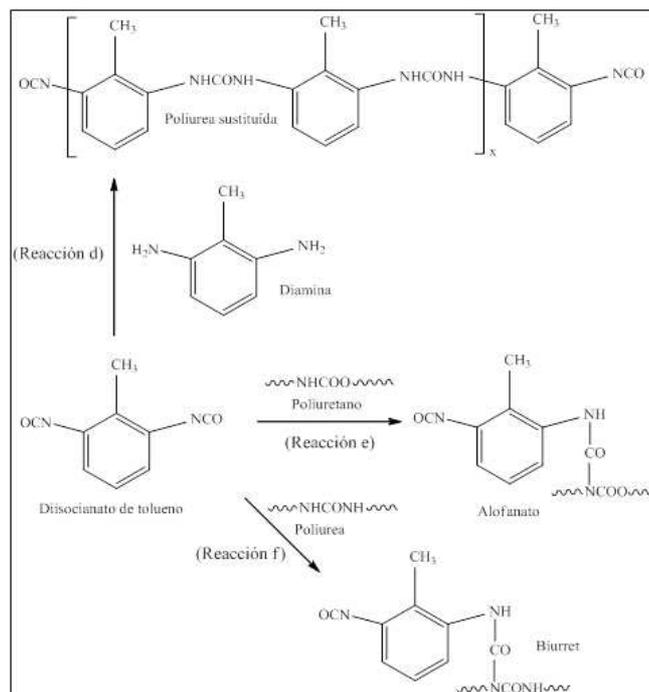


Figura 3: Reacciones de formación de Poliurea, alofanato y biuret

En resumen, las propiedades finales de las espumas de poliuretano dependen de los enlaces uretano, poliurea, alofanato y biuret presentes a lo largo de la cadena polimérica. En el caso de las piezas utilizadas como apoyo cabeza de automóviles se buscan espumas flexibles con poco grado de entrecruzamiento (principalmente debidas a la reacción a, b y c figura 2) y donde los enlaces poliureas, alofanato y biuret son pocos comunes.

En cuanto al estudio estequiométrico realizado (Tabla 1), el diisocianato de tolueno presenta un exceso de 0,9536 equivalentes en la reacción de polimerización (figura 2, reacciones a y b). No obstante, al reaccionar con los 0,9000 equivalente de agua añadidos para propiciar el proceso de espumación (figura 2, reacción c) restan 0,0536 equivalentes (4,69 gramos), lo cual constituye un exceso de 5% de diisocianato de tolueno por cada moldeado. Considerando que diariamente se fabrican 1200 unidades de moldes de apoyo cabeza para automóviles, el exceso de diisocianato de tolueno corresponde a  $5,63\text{ kg/día}$ .

Aun cuando el exceso de TDI no es tan elevado, este compuesto está catalogado como posible

Tabla 1: Estudio estequiométrico de la reacción de polimerización de espumas de poliuretano

Materia Prima	Cantidad por moldeado) (g $\pm$ 0,1	Peso equivalente (PE) (g/eq) $\pm$ 0,1	Nº de Equivalentes (eq) $\pm$ 0,0001
Poliol Base	154,6	1700,0	0,0909
Poliol Polimérico	85,6	2500,0	0,0342
Diisocianato de tolueno	98,4	87,5	1,1931
Surfactante A*	0,6	-	-
Surfactante B*	1,4	-	-
Agua	8,1	9,0	0,9000
Dietanolamina	2,6	56,6	0,0459
Catalizador A	0,2	67,1	0,0030
Catalizador B	0,2	67,1	0,0030
Catalizador C*	0,1	-	-

NOTA: Equivalentes totales de OH en la reacción de polimerización: (0,1710  $\pm$  0,0001)eq.

\* No aportan grupos OH en la reacción de polimerización.

cancerígeno humano en el más reciente reporte de Programa Nacional de Toxicología de EE.UU. [11], por lo que se propone realizar estudios para su disminución en la formulación hasta niveles estequiométricos, lo que permite a su vez optimizar el uso de las materias primas.

El TDI en exceso puede quedar retenido dentro de la espuma, y bajo la acción de las altas temperatura a la cual está sometido un automóvil bajo el sol durante toda su vida útil, existe el riesgo de su volatilización. No obstante, existen discrepancia al respecto, ya que hay autores [12] que realizaron estudios para determinar la habilidad de la espumas de poliuretano de liberar el TDI al aire y encontraron que era poco probable que ocurriera en cantidades tóxicas, bajo las condiciones de estudio (Temperatura: 37 °C, humedad relativa: 30 %). Sin embargo, Dernehl [13], demostró que por calentamiento directo, el poliuretano se descompone en productos tóxicos (HCN e isocianatos) e incluso a temperaturas de 60 °C el TDI puede ser liberado a la atmósfera. Por otra parte, la hoja de seguridad del poliuretano lo cataloga como no tóxico salvo por calentamiento directo debido a que se generan productos de descomposición nocivos para la salud [14]. Finalmente, y tomando en cuenta que después de su vida útil las espumas de poliuretano son dispuestas en vertederos a cielo

abierto, donde la probabilidad de incendios es alta, es ambientalmente recomendable disminuir el exceso TDI en la formulación.

## 7. Caracterización de la corriente gaseosa

El estudio se focalizó en compuestos orgánicos volátiles (COV) ya que éstos son los posibles contaminantes que se pueden encontrar en la corriente gaseosa, debido a que la temperatura alcanzada durante el proceso no permite la descomposición en forma de óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono.

En la Tabla 2 se muestran los resultados de la determinación de COV. Como se puede apreciar todas las muestras presentan concentraciones de compuestos orgánicos volátiles totales por debajo del límite establecido en el decreto 638, siendo tolueno y heptano los compuestos orgánicos encontrados en la corriente gaseosa.

Para la fabricación de TDI se utiliza como materia prima inicial el tolueno, el cual se somete a varias reacciones [nitración, reducción del grupo nitro y posterior reacción con fosfógeno (COCl<sub>2</sub>)] para dar una mezcla de los isómeros 2,4 y 2,6 – diisocianatos [9]. Con esto se desea mostrar que el tolueno encontrado en el análisis pudiera ser un exceso del utilizado durante la producción del TDI, o que el equipo esté detectando el TDI en forma de tolueno, lo cual es posible ya que el

Tabla 2: Determinación de COV totales y COV específicos en la corriente gaseosa

Muestras	Concentración de COV totales ( $C_A \pm 0,01 ppm$ )	Velocidad másica de COV totales ( $V_m \pm 0,01 kg/h$ )	COV encontrado
1	1,20	0,85	Tolueno
2	1,55	1,10	Heptano
3	1,27	0,90	Heptano
4	1,41	1,00	Heptano
Promedio	1,36	0,96	–

mismo se encuentra en exceso en la formulación. No obstante, su concentración es pequeña y muy por debajo de lo establecido en el decreto N° 638, y además sólo se encontró en una muestra analizada.

Las otras tres muestras presentaron una velocidad másica promedio de  $1,00 kg/h$ , encontrándose heptano en las mismas. La fuente de origen de estas emisiones provienen de la cera utilizada para facilitar el proceso de desmolde de la espuma, la cual está constituida por un 65 % de resina emulsionada, 10 % de naftas y 25 % de heptano [15], siendo éste último un solvente volátil a la temperatura y presión de trabajo. No obstante, sus emisiones están por debajo del límite establecido en el decreto N° 638, pero sería recomendable hacer un estricto seguimiento ya que el heptano es considerado ecotóxico [16].

Es importante acotar, que pese a que no se sobrepasan los límites de emisión de COV en aire, no existe total cumplimiento con lo establecido en el decreto N° 638 [3], ya que el artículo 15 prohíbe el empleo de técnicas de dilución o dispersión (extractores en planta), como método primario o único de control para reducir la concentración de gases contaminantes. Por otra parte, el artículo 12 del mismo decreto, establece que las chimeneas y ductos de fuentes fijas deben estar diseñadas de forma que se optimice la dispersión de los contaminantes emitidos, para evitar que a nivel del suelo se sobrepasen los límites de calidad del aire, si se presentan condiciones meteorológicas desfavorables. Es por ello que se recomienda repetir la caracterización en los puntos de muestreos determinados a lo largo de la chimenea y comparar con los resultados obtenidos en la parte inferior de la misma.

## 8. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS DE CONTROL

Actualmente existen varios métodos para el control de las emisiones gaseosas. Entre las más sofisticadas se pueden mencionar las tecnologías de membrana de separación, oxidación térmica y oxidación catalítica. No obstante, los niveles de emisión de los contaminantes no justifican los altos costos de inversión que requieren estas tecnologías, por lo que solamente se tomaron en consideración aquellas tecnologías cuyos controles operativos posean especificaciones de trabajo que puedan ser fácilmente instaladas en el proceso (adsorción, absorción y condensación).

A fin de realizar una selección entre estas tres tecnologías se realizó una matriz de ponderación basada en cuatro criterios: factibilidad técnica (30 %), adaptación de la tecnología al proceso operativo en estudio (20 %), costos de instalación (30 %), costos de operación (20 %), cuya evaluación se muestra en la Tabla 3.

Las tecnologías de control basadas en procesos de adsorción y absorción presentan una alta eficiencia para la remoción de COVs (90 – 98 %) mientras que la condensación ofrece una mediana eficiencia [17]; no obstante, las técnicas de absorción y condensación no están recomendadas para emisiones con bajas concentraciones de COVs [18].

En cuanto a la facilidad de adaptación al proceso en estudio, existe en el mercado una gran cantidad de filtros de adsorción de diferentes tamaños que pueden ser adaptados al proceso sin mayores complicaciones. No ocurre lo mismo con las tecnologías de absorción y condensación que requieren la incorporación de equipos adicionales,

Tabla 3: Matriz de selección de la alternativa de control aplicable al proceso

CRITERIOS	Porcentaje (P) %	ADSORCIÓN		ABSORCIÓN		CONDENSACIÓN	
		Valoración (V)	P*V	Valoración (V)	P*V	Valoración (V)	P*V
Factibilidad técnica	30	5	150	4	120	3	90
Adaptación de la tecnología al proceso	20	4	80	3	60	2	40
Costos de instalación	30	4	120	3	90	2	60
Costos de operación	20	5	100	4	80	3	60
		Total	450	Total	350	Total	250

y su distribución en el área de trabajo disponible.

Finalmente, el proceso de adsorción presenta costos de operación entre  $(15 - 60)m^3/h$  en comparación con la absorción y la condensación de  $(40 - 200)m^3/h$  [18]. Debido a esto, la tecnología de adsorción es la más conveniente para el control de las emisiones gaseosas en el proceso de fabricación de moldeados de espuma de poliuretano, principalmente debido a su alta eficiencia, disponibilidad de proveedores y bajos costos.

Para implementar la tecnología seleccionada, es necesario ubicar dentro del ducto un soporte para la colocación del lecho filtrante y a su vez que permita su fácil remoción. Se recomienda colocar dos (2) filtros uno al lado del otro para cubrir totalmente el área de extracción. A parte del lecho filtrante también se recomienda realizar las siguientes modificaciones:

- Incorporación de un manómetro diferencial que permita medir los cambios de presión y así evaluar la eficiencia de los filtros y el tiempo de reposición de los mismos.
- Cambiar el extractor para aumentar la velocidad con la cual se canaliza la corriente gaseosa del proceso fuera del área laboral de la planta y así mejorar la eficiencia con la que el afluente contaminado pasa a través de los lechos de adsorción.

En la Tabla 4 se muestran las especificaciones del manómetro y del extractor recomendados. Para el proceso en estudio, el proveedor sugiere un cambio bimensual de los filtros, pero con la finalidad de aumentar ese tiempo se recomienda monitorear la caída de presión del sistema para verificar la eficiencia de los mismos en el tiempo y estudiar exactamente el momento adecuado para el cambio.

## 9. CONCLUSIONES

El proceso de fabricación de moldeados de poliuretano se realiza en cuatro etapas a una temperatura máxima de  $120\text{ }^\circ\text{C}$  y a presión ambiente, con una capacidad productiva de 1200 moldeados por día.

El análisis estequiométrico involucrado en la síntesis de espumas de poliuretano es complejo ya que involucra varias reacciones, encontrándose que la formulación presenta un 5 % de exceso de diisocianato de tolueno (TDI), el cual puede quedar retenido dentro de la espuma y volatilizarse durante el proceso de fabricación, en el tiempo de vida útil del apoya cabeza o en su disposición final.

Las emisiones de compuestos orgánicos volátiles tienen concentración promedio de 1,36 ppm y velocidad másica promedio de  $0,96\text{ Kg/h}$ , por lo que están por debajo de los límites establecidos en la legislación venezolana sobre la calidad de aire y control de la contaminación atmosférica (Decreto N° 638).

La empresa sólo utiliza sistemas de dispersión de contaminantes como único método de control de emisiones, por lo que se propone la introducción de filtros de adsorción en el ducto, principalmente debido a su alta eficiencia, aplicabilidad a bajas concentraciones del efluente, disponibilidad de proveedores y bajos costos.

## Referencias

- [1] Richardson & Lokensgard (2003). "Industria del Plástico" Thomson editores. España.
- [2] Odian, G. (2004). "Principles of Polymerization" John Wiley & Sons, Inc., Publications (Fourth edition). New York.
- [3] Normas sobre la calidad de aire y control de la contaminación atmosférica, Decreto N° 638. (1995). Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 4899 (Extraordinaria), mayo 19, 1995.

Tabla 4: Especificaciones del manómetro diferencial y el extractor

Manómetro Magnehelic MG		Extractor	
Tamaño nominal ( <i>mm</i> )	125	Tipo de Aspa	Helicoidal
Sistema	Membrana de goma de silicona	Diámetro ( <i>m</i> )	0,61
Precisión	1/8"	Potencia del motor ( <i>HP</i> )	3/4
Angulo de medición (°)	80	Caudal de trabajo ( <i>m</i> <sup>3</sup> / <i>h</i> )	4200
Rango ( <i>inH<sub>2</sub>O</i> )	0-1,0		

- [4] Hevaengton, R. (1997). "Productos de poliuretano, espumas flexibles". Editorial Dowm. Texas.
- [5] Norma venezolana COVENIN 1649 (1996). "Chimeneas y ductos. Determinación de la ubicación y número mínimo de puntos de muestreo". 3era revisión. FONDONORMA. Caracas
- [6] U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA). (1999)."Compendium Method TO-17. Determination of volatile organic compounds in ambient air using active sampling onto sorbent tubes". Second Edition. Center for environmental research information. Office of research and development. Cincinnati, OH. Disponible en: <http://www.epa.gov/ttn/amtic/airtox.html>
- [7] Norma venezolana COVENIN 3513 (1999). "Chimeneas y Ductos. Determinación de la concentración de compuestos orgánicos gaseosos totales". FONDONORMA. Caracas.
- [8] Norma venezolana COVENIN 1833 (2006). "Chimeneas y Ductos. Determinación velocidad promedio y flujo volumétrico". (2a. Revisión). FONDONORMA. Caracas.
- [9] Vilar W. (2004). "Química e Tecnologia dos Poliuretanos" (3a ed.). Vilar Consultoria. Río de Janeiro.
- [10] Occhiello E. and Corti M. (2003) "Polyurethanes" John Wiley & Sons, Inc., publication. New York.
- [11] U.S. Department of Health and Human Services (DHHS) (2009). "Report on Carcinogens" Eleventh Edition. Public Health Service, National Toxicology Program. Disponible en: <http://ntp.niehs.nih.gov/ntp/roc/eleventh/profiles/s177tdi.pdf>.
- [12] Hugo J., Spence M. and Lickly T. (2000). "The determination of the Ability of Polyurethane Foam to Release Toluene Diisocyanate into Air." Applied Occupational & Environmental Hygiene. Vol. 15, No. 6, pp. 512-519.
- [13] Dernehl C. (1987). "Health Hazards Associated with polyurethane foams" Journal of Occupational and Environmental Medicine. Vol. 8. No. 2, pp. 59-62.
- [14] Material Safety Data Sheet (MSDS) (2003). "Safety data for Polyurethane" Safety Officer in Physical Chemistry at Oxford University. U.S.
- [15] Hoja de Seguridad (2001). "Concentrol LP FA-45-08". Productos Concentrol, S.A.
- [16] International Chemical Safety Cards (ICSC) (2006) "Heptane" (ICSC: 0657). International Programme on Chemical Safety (IPCS).
- [17] Aguado S., Polo A., Coronas J. y Santamaría J. (2002). "Eliminación de compuestos orgánicos volátiles del ambiente" Mapfre Seguridad. No. 87 - Tercer Trimestre. pp. 23 - 31.
- [18] Pina M., Irusta S., Menéndez M y Santamaría J. (2003). "Eliminación de COVs mediante combustión catalítica" Dpto. Ingeniería Química y Tecnologías del medio Ambiente. Universidad de Zaragoza. España.