

UNIVERSIDAD EAN

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN GERENCIA DE PROCESOS Y CALIDAD

ANÁLISIS DEL CUMPLIMIENTO DE LOS NIVELES PERMITIDOS DE
ACETALDEHÍDO EN ENVASE PLÁSTICO AL REALIZAR REFORMULACIONES CON
PCR

AUTORES:

ELIANA MARÍA GARCÍA ALVAREZ
JEIMMY GRACIELA ARDILA BOLAÑOS
JESSICA LORENA GONZÁLEZ LEGUIZAMO

DIRECTOR:

LINA MARÍA CHACÓN RIVERA

BOGOTÁ D.C, MAYO 2022

Resumen

La búsqueda de iniciativas para hacerle frente a la problemática ambiental provocada por los plásticos de un solo uso ha generado que algunas empresas dentro del proceso de generación de preformas realicen formulaciones para mezclar resina virgen con PCR (Plástico post consumo), sin embargo, dentro del proceso de polimerización del plástico se genera acetaldehído que al ser utilizado para envasar bebidas debe mantenerse en una concentración menor de 10 ppm para no afectar la salud de los consumidores. Por lo cual, la presente investigación describe la modificación de las botellas PET con la máxima cantidad de material reciclado y el análisis de concentración de acetaldehído mediante cromatografía de gases para no incumplir la normatividad frente a la generación de acetaldehído en los procesos de inyección PET, y la identificación de los riesgos asociados a la salud del consumidor final en caso de exceder la concentración del acetaldehído.

Palabras Clave — Polietileno tereftalato, acetaldehído, plástico post consumo.

Abstract

The search for initiatives to deal with the environmental problems caused by single-use plastics has led some companies within the process of generating preforms to make formulations to mix virgin resin with PCR (post-consumer plastic), however, within the polymerization process of the plastic generates acetaldehyde that, when used to package beverages, must be stabilized at a concentration of less than 10 ppm so as not to affect the health of consumers. Therefore, the present investigation describes the modification of the amount of PET bottles with the maximum amount of recycled material and the analysis of acetaldehyde concentration by gas chromatography so as not to breach the regulations against the generation of acetaldehyde in the processes of PET injection, and the identification of the risks associated with the health of the final consumer in case of exceeding the concentration of acetaldehyde.

Keywords: Polyethylene terephthalate, acetaldehyde, post-consumer plastic

Planteamiento del Problema

El plástico es un material que para su proceso de producción depende principalmente de combustibles fósiles que son recursos no renovables, a nivel mundial el crecimiento en la producción del plástico ha incrementado en los últimos años, tanto así que, para el año 2050 la industria del plástico podría representar el 20% del consumo total a nivel mundial de petróleo (World Economic Forum, 2016). La producción de plásticos en los últimos años se ha enfocado principalmente en plásticos de un solo uso, tales como los termoplásticos que se pueden recalentar, reformar y congelar repetidas veces. Uno de ellos es el polietilén tereftalato (PET) el cual, es un plástico 100% reciclable y fácilmente reprocesable, sin embargo, a nivel mundial, el 79% de los plásticos post consumo yace principalmente en vertederos y solo el 9% de los plásticos consumidos han sido reciclados (ONU, 2018), para el caso de Colombia solamente el 26% del total del plástico consumido es reciclado o reprocesado (Valderrama et al., 2018).

Existen algunas iniciativas para hacerle frente a la problemática ambiental generada por los plásticos de un solo uso, tal como la introducción en varios países de la Responsabilidad Extendida del Productor (REP) que ha demostrado ser eficaz a la hora de reducir los desechos generados por las botellas PET dado que, permite a los productores mantener un grado de responsabilidad frente al impacto ambiental generado por sus productos a lo largo de su ciclo de vida (Ministerio de ambiente, s.f.), tal es el caso de, Amcor Rigid Packaging ubicada en Tocancipá Inhouse Bavaria, empresa dedicada al soplado de botellas y que en promedio mensual provee a Bavaria de 15 millones de botellas para el proceso de producción de Pony Malta y agua Zalva.

Amcor en búsqueda de iniciativas que permitan incrementar la cantidad de plástico reciclado utilizado dentro de sus procesos de inyección y soplado para disminuir los desechos generados a partir de plásticos de un solo uso, ha realizado

reformulaciones en sus botellas para mezclar la resina virgen con PCR (Plástico post consumo) sin embargo, dentro del proceso de soplado de botellas, cuando las preformas son calentadas y posteriormente infladas usando aire a alta presión, se puede presentar un aumento de concentración de acetaldehído. (Hernández, 2013).

El acetaldehído es una impureza generada en el proceso de polimerización del PET y que al ser utilizado para envasar bebidas debe mantenerse en una concentración menor de 10 ppm dado que este compuesto orgánico es 20 veces más tóxico que el alcohol y es un posible carcinógeno (Gómez, 2016). El acetaldehído ha demostrado características mutagénicas en células procariotas y eucariotas, se ha comprobado que su papel pre- cancerígeno ocurre en concentraciones estimadas de 1,76 ppm a 44,05 ppm de acetaldehído (Rivera et al., 2016), concentraciones en las cuales se encuentra el rango permitido para las botellas PET.

Esta investigación busca definir la formulación en botellas PET que contenga el mayor porcentaje de plástico post consumo que permita cumplir con la normativa frente a los niveles de acetaldehído que sean seguros toxicológicamente para el consumidor final y disminuir los desechos generados por plásticos de un solo uso, dado que, en la actualidad, Amcor continúa realizando reformulaciones dentro de sus procesos de inyección y soplado de botellas, pero no ha logrado definir el porcentaje máximo de PCR que puede ser mezclado con resina virgen para no exceder los niveles de concentración de acetaldehído (10 ppm).

Pregunta de investigación

¿Cuál sería el porcentaje máximo admisible de PCR (Reciclado post consumo) en la formulación de botellas PET sin sobrepasar los niveles permitidos de acetaldehído?

Objetivo General

Determinar cuál es la máxima cantidad admisible de PCR dentro de las formulaciones de botellas PET que permita cumplir la normatividad frente al nivel permitido de acetaldehído.

Objetivos específicos

- Conocer el proceso de inyección de las preformas.
- Identificar las variables que afectan los niveles de acetaldehído en los procesos de inyección de preformas.
- Investigar sobre los posibles riesgos a la salud del consumidor que generan los altos niveles de concentración del acetaldehído.
- Comparar los niveles de acetaldehído generados en la polimerización al incrementar el porcentaje de PCR en las formulaciones de envases de PET.
- Definir el porcentaje máximo de PCR que se puede mezclar con resina virgen para cumplir con la normatividad frente a la concentración máxima permitida de acetaldehído.

Justificación

El racional de la presente investigación acerca del incremento en el porcentaje del plástico reciclado Post – Consumo utilizado dentro de las nuevas formulaciones de envases PET y los niveles de acetaldehído con el fin de que sean seguros para el consumidor final, se centra en el daño que puede provocar el compuesto químico del acetaldehído que se traslada a los alimentos por medio de su empaque y que de acuerdo a los niveles de concentración puede llegar a ser tóxico para el consumidor final.

Ahora bien, teniendo en cuenta que el acetaldehído tiene presencia dentro de los envases PET y que puede producir efectos adversos en el consumidor final si no se

tiene el punto de ebullición a la temperatura correcta, es de tener en cuenta el riesgo que se tiene de forma toxicológica ya que “Las botellas de plásticos PET es el segundo tipo de envase más popular en el mercado mundial de productos de consumo masivo, después del plástico flexible” (Juárez, 2017).

Debido a este aumento y conociendo el envasado de líquidos en botellas de polietileno tereftalato (PET), como uno de los materiales más ampliamente utilizados, es un tema que actualmente se está revisando debido a la creciente preocupación sobre la toxicidad de los materiales poliméricos, plásticos, en contacto con alimentos de consumo humano, el cual motiva a llevar a cabo esta investigación.

A pesar de que el PET es considerado uno de los plásticos más inocuos para la salud humana, existen compuestos como el acetaldehído que se encuentran presentes al realizar la polimerización del plástico y que en observaciones se ha identificado que el acetaldehído es un compuesto volátil, genotóxico en varios sistemas biológicos y considerado como un posible carcinógeno humano por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) dependiente de la OMS (Cobos, R. 2016)

Se define según la información ya planteada que el campo de investigación se centra en, Ciencia Tecnología e Innovación. El grupo de Investigación a enfocar será Tecnológico ONTARE, por ultimo y no menos importante la línea de investigación inclinada a la gestión y diseño de los procesos.

Adicionalmente, si se logra un incremento significativo en el porcentaje de PCR utilizado en la formulación de botellas PET, surge la oportunidad de negocio para la empresa Amcor Rigid Packaging para aprovechar un residuo plástico 100% reciclable y fácilmente reprocesable, generando una disminución en el impacto ambiental porque se generaría un control frente al destino de los residuos que se producen a causa de los envases de sus productos luego de su consumo, asimismo, frente a los consumidores actuales que buscan empresas con un pensamiento ambientalmente

responsable se podría aumentar el marketing de la empresa ya que, podría llegar a utilizar este proceso para transmitir a la sociedad su enfoque frente a Responsabilidad social empresarial y generar consciencia en los consumidores para que se incremente el reciclado de envases y generar campañas con enfoque consumidor – empresa para realizar la logística de retorno del envase post consumo a las instalaciones de amcor rigid Packaging para su procesos de formulaciones.

Marco Teórico

A nivel mundial la producción de polietilén tereftalato es de aproximadamente 12 millones de toneladas métricas, dada la importancia de este material al sustituir al vidrio y al policloruro de vinilo por ser un material mucho más manejable. El PET es el plástico más reciclado a nivel mundial, ahorrando un 84% de la energía necesaria y reduciendo más de un 70% las emisiones de gases de efecto invernadero al producir PET nuevo. En cuando a toxicidad, el PET es un material que se encuentra avalado por la Food an Drug Administration (FDA) para estar en contacto con alimentos para consumo humano (Beltrán, 2012).

Aunque el PET se encuentra avalado por la FDA es necesario asegurar la inocuidad de este material principalmente cuando se encuentra en contacto con productos alimenticios. Al ser el PET uno de los plásticos más reciclados a nivel mundial genera preocupación por parte de los consumidores dado que en los análisis de plásticos PET se revela la presencia de sustancias intencionalmente añadidas o producidas dentro de los procesos de inyección/soplado de botellas (Cobos, 2016).

Proceso de inyección de plástico

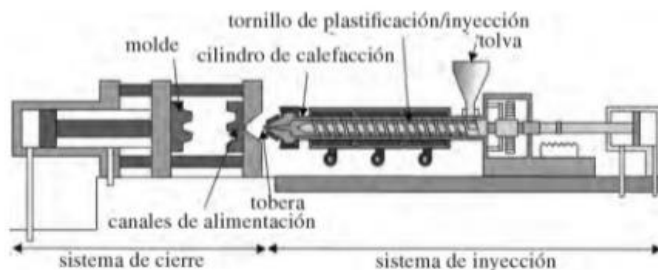
Para fabricar piezas en plástico se acude a diversos procesos, tales como, inyección, soplado, roto- moldeo e inmersión, siendo el moldeo por inyección una de las técnicas más comunes para el procesamiento de los plásticos. Este proceso consiste en fundir el polímero y hacerlo fluir bajo presión y temperatura en un molde, en el cual la pieza

solidifica y al enfriarse la pieza moldeada bajo presión se obtienen las dimensiones y la forma deseada (Prada, 2017). Este material se solidifica obteniéndose la pieza final al abrir el molde y eliminar los posibles restos de material en los canales de alimentación del molde (Albarrán, 2014).

En el proceso de inyección el polímero es fundido e inyectado a través de boquillas en un molde de preforma. Este molde se abre y hace girar a la barra de núcleo (que forma la parte interna de la preforma), posteriormente la barra de núcleo se abre y permite el ingreso del aire comprimido que finalmente da la forma al artículo acabado. Después de un período de enfriamiento, el molde de soplado se abre y la barra de núcleo se gira a la posición de expulsión, para retirar el artículo final (Hernández, 2013).

La ventaja del proceso de inyección es la posibilidad de fabricar piezas a altas velocidades de producción (Albarrán, 2014). La importancia del proceso de inyección ha generado investigaciones para comprender los efectos de las variables del proceso por inyección sobre las propiedades finales que adquiere la pieza moldeada, tales como, la influencia directa de la velocidad de inyección, las características mecánicas adquiridas por la preforma, el acabado superficial, los niveles de concentración de acetaldehído, entre otras (Juárez, D.,2012).

Ilustración 1 Inyección Convencional



Adaptado de: Beltrán, M., Marcilla, A. (2012). Tecnología de polímeros: Procesado y propiedades. Universidad de Alicante, pp. 87 – 89

¿Qué es el acetaldehído?

Las botellas de PET se fabrican en un proceso de dos etapas. En primer lugar, las denominadas preformas se fabrican en el proceso de moldeo por inyección a altas temperaturas de unos 260°C mencionado en el apartado anterior. Posteriormente, las preformas se soplan en botellas y se llenan. El acetaldehído se genera en el PET fundido como producto de degradación de los grupos terminales de vinilo de la cadena del polímero PET (Welle, 2018).

Para comprender un poco los posibles efectos que tiene en la salud del consumidor la generación del acetaldehído en los procesos de polimerización del PET cabe aclarar que “El acetaldehído (CH₃CHO) es un componente volátil y genotóxico, el cual es sintetizado y detoxificado por el aldehído deshidrogenasa (ALDH), que ha sido utilizado como saborizante de alimentos y bebidas. El acetaldehído es un químico industrial importante que se usa en la industria del plástico para la síntesis de químicos orgánicos (IARC, 1999). El acetaldehído es un compuesto considerado tóxico, carcinogénico y mutagénico por sus efectos directos sobre inhibir la reparación y metilación del ADN, además de tener un efecto directo sobre este” (Rivera, 2016).

Acetaldehído y sus posibles efectos en la salud del consumidor

El acetaldehído es un compuesto carbonílico relevante que ha sido detectado en estudios de lixiviación de botellas de PET a las bebidas; este compuesto es generado por la degradación termo mecánica y termo oxidativa del PET. El acetaldehído es considerado como un posible carcinógeno humano por la agencia de investigación del cáncer (IARC) de la Organización Mundial de la Salud. Por ello, con la finalidad de disminuir los niveles de concentración del acetaldehído se emplea la 2-aminobenzamida o antranilamida que actúan como agentes secuestrantes, dado que, además de su toxicidad, el acetaldehído puede provocar modificaciones en las

cualidades organolépticas de las bebidas, siendo su umbral del sabor 10 µg/L (retronasal) y 25 µg/L (ortonasal). (Ceretti, 2010).

De igual manera, en Estados Unidos se realizaron estudios sobre los niveles de concentración de acetaldehído en botellas de polietilén tereftalado PET, como resultado se obtuvo que, durante la degradación térmica del PET, cuando el polímero mantiene altos niveles de concentración de acetaldehído puede modificar el sabor de los alimentos o bebidas y en los seres humanos probablemente podría llegar hacer cancerígeno (Dabrowska, Borcz, & Nawrocki, 2003). Asimismo, a los plásticos y botellas PET por ser de la familia de los ftalatos se le atribuye al uso de estos plásticos algunos problemas relacionados con la fertilidad en hombres y mujeres, asma y problemas endocrinológicos (Gómez, 2016)

Por otro lado, en estudios recientes se ha demostrado que “el acetaldehído puede causar modificaciones celulares a partir de una concentración de 100 micro gramos o más. De igual manera, se ha concluido que el acetaldehído interfiere con los mecanismos de reparación del ADN al inhibir la O6-metilguaninatransferasa. Además, se ha demostrado que el acetaldehído causa mutaciones en la guanina-hipoxantina-fosforiltransferasa en los linfocitos humanos. De la misma forma, se ha considerado que puede inducir cambios de tipo «hermana-hermana» en las cromátides y grandes aberraciones cromosomales. Igualmente, se han estudiado las deficiencias en enzimas características de ciertos grupos poblacionales, por lo que se sabe que las mutaciones en el gen ADH y ALDH2, proporcionan un excelente modelo de estudio en humanos acerca de la exposición a acetaldehído” (Rivera, 2016).

Variables que influyen en la generación de acetaldehído

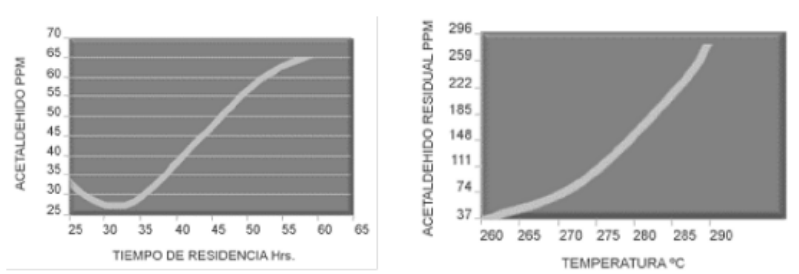
Como ya se mencionó el acetaldehído se genera en el PET fundido durante la producción de preformas como producto de degradación del PET y es una de las

sustancias que migran de las botellas de PET a las bebidas para consumo humano, ya que, es una sustancia muy volátil con un punto de ebullición de 21°C (Dong, 1980).

El conocimiento de las variables que afectan el comportamiento de migración del acetaldehído en el PET es de vital importancia para los fabricantes de preformas y botellas PET como para las empresas envasadoras de productos para consumo humano dado que los consumidores pueden detectar el acetaldehído incluso en concentraciones muy bajas en el rango de 10 a 20metrog/L (0,01–0,02 ppm) como sabor afrutado dentro de los productos (Welle, 2018).

Durante el proceso de inyección existen dos variables principales que rigen el proceso: temperatura y tiempo de residencia, las cuales están directamente involucradas con la generación de acetaldehído, existe otra variable que es la velocidad del husillo, pero para efectos académicos consideraremos que las rpm (revoluciones por minuto del husillo) son constantes y no afectan significativamente en la generación de acetaldehído.

Ilustración 2 Variables que afectan la generación de acetaldehído



Adaptado de: Hernández, J. (2013). Principio de funcionamiento del sistema de inyección y análisis para la comprensión de la influencia del defecto rebaba de preformas PET. Revista Ingeniería UC, 20(1), 42-52.

La temperatura y el tiempo de residencia tienen un efecto significativo en la cantidad de partes por millón de acetaldehído generados en la preforma, mientras mayores sean estas variables se corre el riesgo de generar una cantidad indeseable de acetaldehído (Hernández, 2013).

Asimismo, Dong (1980) encontró que de acuerdo al tipo de muestra analizada de PET se podía oscilar entre diferentes rangos de acetaldehído presentes en el polímero, se encontró que para la resina comercial los niveles de acetaldehído se encontraban entre las 0,5 y 6,0 ppm, para el caso de la resina amorfa los valores se encontraban en un rango de 30-60 ppm y de 6-24 ppm para preformas y botellas. Es decir, que el nivel de acetaldehído aumenta de resina a preforma/botella porque se forma durante el proceso de fusión. Sin embargo, esta investigación fue realizada con un número limitado de muestras por lo cual, puede que los datos arrojen niveles de acetaldehído poco confiables frente a los niveles de concentración disponibles actualmente.

Métodos de análisis de los niveles de acetaldehído en las preformas

Existen varios factores que influyen en la migración de los aldehídos al producto. El principal factor es la concentración de estos compuestos en el material utilizado para embotellar, según un estudio publicado en el año 2003 en la revista Food Additives & Contaminants. En este estudio se comparó la cantidad de acetaldehído presente en agua embotellada en PET y se vio que en la concentración de este compuesto era bastante superior. También se comparó la cantidad de acetaldehído que migraba al agua en dos preformas, una con mayor concentración de AA en su pared y se vio que, efectivamente, cuanto mayor es la cantidad de AA en la pared, mayor será la cantidad de este compuesto que migra al producto. Un estudio posterior, del año 2006, publicado en esta misma revista, llegó a esta misma conclusión mediante otro experimento. En este estudio se compararon los niveles de AA en el material PET y en el agua contenida, de varias botellas de Japón, Europa y Norteamérica. Se observó que una mayor cantidad de AA migraba de las botellas japonesas, cuyo contenido en estos compuestos era superior al de las botellas de Europa y Norteamérica. Una posible explicación es que en Japón se utilizan temperaturas más altas en la fabricación de las botellas de PET, lo cual provocaría una mayor cantidad de AA en el material final. Otro factor muy importante es la presencia de CO₂ en el agua. Varios

estudios coinciden en que existe una correlación positiva entre la cantidad de CO₂ contenida en el agua y el contenido final de AA en el agua embotellada (Cretu, 2018). También se ha investigado la influencia de la luz sobre la migración de acetaldehído. En un estudio publicado en el año 2015 se realizó un experimento para determinar la influencia de la exposición a la luz solar en la migración de acetaldehído en aguas embotelladas en envases de PET. Para ello, un grupo de botellas se almacenaron a oscuras y otro grupo se almacenó en el tejado del laboratorio, expuesto a la luz, durante 1, 7, 14, 29, 46, 70, 82 y 100 días. Con este experimento se determinó tanto la influencia de la luz solar como la del tiempo de almacenamiento. Ambos factores tienen una correlación positiva con la migración de AA del envase al agua que contiene. Baumjohann et al. (2015) simularon condiciones más extremas que la luz solar. Para inducir la migración se utilizó una lámpara de radiación UVA y UVB, ya que se considera que, en la luz natural, la radiación UV es la que mayor efecto tiene sobre la migración de acetaldehído. Además, también se comprobó si la exposición a esta radiación tiene un efecto sinérgico con el aumento de temperatura. Se utilizaron dos tipos de agua: carbonatada y de carbonatación media. Los resultados obtenidos concuerdan con aquellos obtenidos en el estudio anterior, ya que se ha visto que la exposición a la luz incrementa la migración de acetaldehído. De este estudio concluimos además que un incremento en la temperatura supone también un incremento en la liberación de acetaldehído.

Los niveles de concentración de acetaldehído en el Polietilén tereftalato por lo general son determinados mediante cromatografía de gases, existen dos métodos principales los cuales son descritos a continuación:

Método de preforma molida

En el primer paso de este método, las preformas se cortan en trozos pequeños y posteriormente son molidos hasta obtener un polvo en presencia de nitrógeno líquido. La muestra es equilibrada a una temperatura entre 130 y 150 grados centígrados, una

muestra del polvo de PET se inyecta en un CG para realizar la cromatografía de gases. La principal desventaja del método de la preforma molida es que la sustancia volátil acetaldehído puede perderse durante la preparación de la muestra y generar incertidumbre frente al verdadero nivel de concentración de acetaldehído (Welle, 2018).

Método de Preforma Sin Moler

En el método de análisis directo de acetaldehído en Polietilén tereftalato, las preformas o botellas de PET se cortan en pequeños trozos. Posteriormente, las muestras se equilibran a una temperatura de 200 grados centígrados para luego pasar la muestra para cromatografía de gases. Sin embargo, a tal temperatura, el acetaldehído podría regenerarse a partir de PET y esto podría resultar en una sobreestimación de la migración de acetaldehído de las botellas de PET (Welle, 2018).

Marco Institucional

AMCOR PET PACKAGING DE COLOMBIA S.A. se dedica principalmente a la fabricación de artículos plásticos para envase de mercancías tales como botellas, garrafones y similares de plástico con código CIUU 2229.

Inició operaciones industriales en Medellín en 1.989 con el nombre Volcán S.A. suministrando envase PET por primera vez en el país a Gaseosas Caribe S.A., adelantándose a los líderes del negocio de las gaseosas Coca-Cola y Postobón en algo más de un año. Durante el inicio se importó resina PET de México y los Estados Unidos, pero luego se logró interesar a ENKA de Colombia en la fabricación de la resina lo cual permitió dejar la dependencia de suministro del Exterior. La fabricación de envases dirigida hacia el mercado de gaseosas y aguas, generó el conocimiento y la experiencia necesaria para explorar nuevos mercados y expandir productos brindando así soluciones de empaque a los sectores tales como: Licores, agroquímicos, aceites, bebidas Isotónicas, productos farmacéuticos, enjuagues bucales y desinfectantes.

En mayo de 1999 Schmalbach-Lubeca Plastic Containers, Multinacional Alemana, líder en el mercado de preformas y envases de PET, adquirió a Volcán S.A., con la idea de ingresar al mercado colombiano.

En Julio de 2002 la empresa australiana Amcor Limited. Adquirió las líneas de producción de PET y tapas de Schmalbach Lubeca Plastic Containers, a nivel mundial, por lo cual cambio la razón social por Amcor PET Packaging de Colombia S.A. En octubre de 2003 se adquirieron las líneas de inyección y soplado de PET pertenecientes a la empresa Allusud S.A. en Latinoamérica, ampliándose la capacidad productiva de Amcor y su participación en el mercado.

En octubre de 2005 se puso en operación, una nueva planta de soplado de botellas en la ciudad de Cali, con la cual se desea brindar cobertura a las necesidades de empaque de clientes ubicados en la zona.

En marzo del 2007 se crea un cambio estructural en la conformación de las Plantas y su distribución en el país, con el fin de optimizar y especializar los procesos:

- El proceso de Preformas se consolidó en la Planta de Itagüí.
- El proceso de Inyector-soplado y Soplado Heat Set en la Planta de Cali.
- Se incremento la capacidad de Producción de la Planta de envase para agua en FEMSA La Calera.

Desde el año 2009 se inicia con la planta de Funza en la cual se maneja la producción tanto de envase como de preforma incrementando la producción a partir del año 2010. Para el 2009 por visión estratégica de la compañía, se define re estructurar la ubicación y capacidad de las plantas en Colombia, como consecuencia se da el cierre de la planta de Itagüí con traslado a Funza de los recursos allá ubicados.

Con una amplia plataforma de equipos de inyección por moldeo para la producción de preformas PET, también está dedicada a la elaboración y comercialización de envases PET, siempre enfocada hacia el mejoramiento continuo, optimizando los recursos disponibles a través del trabajo en equipo.

La estructura organizacional de AMCOR RIGID PACKAGING S.A.S Colombia está dirigida por un Gerente General donde su estructura se divide en 5 Gerencias: Gerencia Comercial, Gerencia Financiera, Gerencia de Operaciones, Gerencia Recursos Humanos, Gerencia de cadena de suministro.

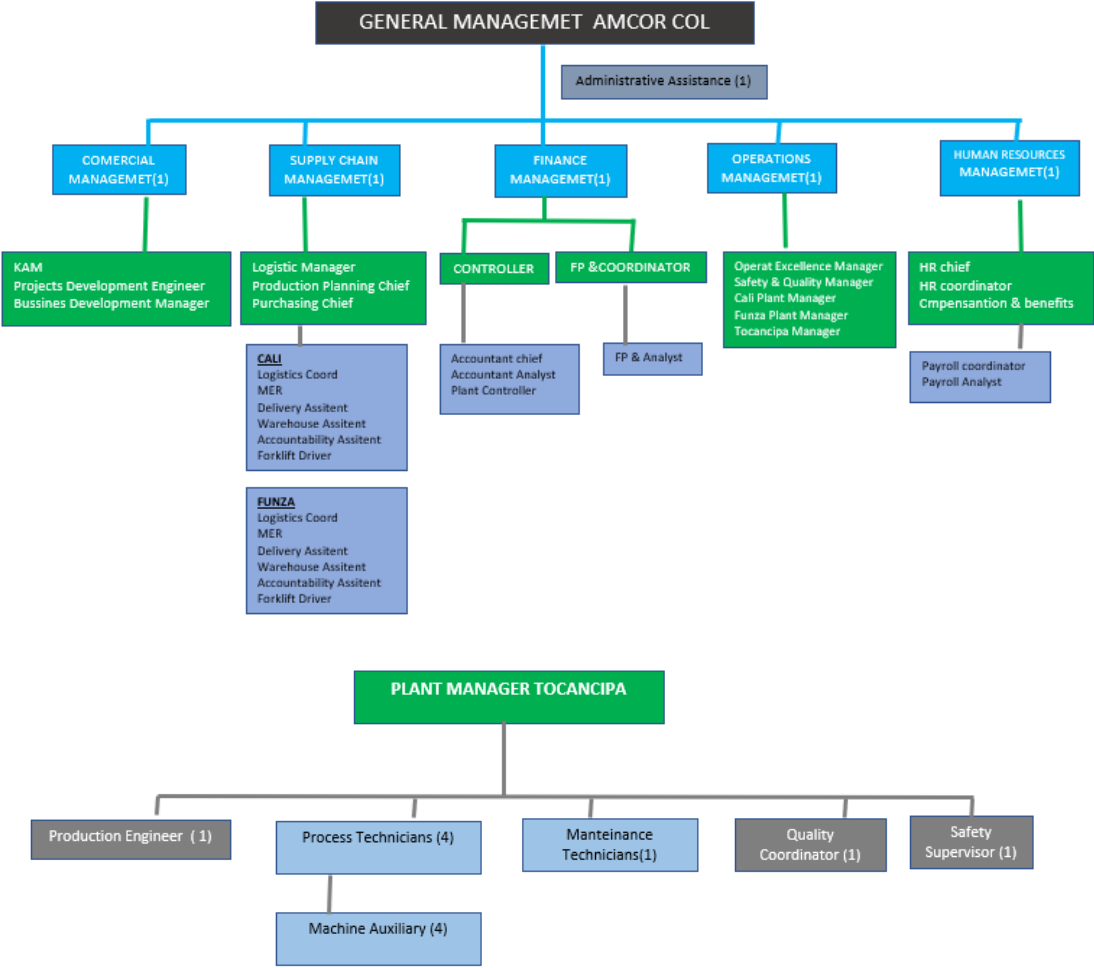


Ilustración 3 Estructura organizacional Amcor Rigid Packaging S.A.S

Metodología

El proyecto se desarrollará mediante un enfoque cuantitativo debido a la utilización de una técnica cromatográfica, que permitirá un análisis frente a la concentración de

acetaldehído en preformas de botellas PET y la determinación del porcentaje óptimo de PCR (Reciclado post consumo) en las formulaciones de botellas PET (Resina virgen + PET) para evitar el incumplimiento de la normativa frente a la concentración máxima en ppm del acetaldehído.

El diseño del proyecto es de tipo aplicado, dado que será realizado para intervenir en el proceso de inyección de preformas dentro de la empresa Amcor Rigid Packaging S.A.S. Para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos se realizará una revisión bibliográfica que permita dar a conocer la información necesaria sobre el proceso de inyección de preformas (considerando el proceso de secado, que afecta también al acetaldehído) y las condiciones ideales de los parámetros como temperatura y tiempo de residencia para no afectar la generación de acetaldehído.

Después de definir las condiciones ideales del proceso de inyección, se tomarán preformas con diferentes formulaciones. Para fines académicos, se realizará un primer análisis con tres preformas que tendrán porcentajes de PCR de 50%, 75% 100%. Posteriormente, se realizará una segunda corrida para analizar los mismos porcentajes y poder comparar que efectivamente los niveles de acetaldehído se encuentran en un rango similar para porcentajes establecidos de PCR. Se consideró que la primera formulación fuera del 50% dado que, en este momento la empresa cuenta con validaciones de acetaldehído en formulaciones que contienen resina + Polietilén tereftalato reciclado post consumo a ese porcentaje.

Para realizar el análisis de las muestras se utilizará una técnica cromatográfica, para esto, será necesario establecer una curva de calibración de acetaldehído para contrastar los niveles de concentración de acetaldehído de las muestras a diferentes porcentajes de PCR frente a un patrón establecido.

Por último, se espera analizar los resultados de cada muestra, para definir cuál es el porcentaje máximo de PCR que se puede adicionar a la formulación de resina virgen +

Polietilén tereftalato sin exceder las 10 ppm exigidas por normatividad para las botellas utilizadas en bebidas de consumo humano.

PRIMER NIVEL

Definición de variables

Niveles de acetaldehído

Las preformas, serán analizadas a través de un proceso de cromatografía de gases para determinar los niveles de acetaldehído representados en ppm y serán comparados con una curva de calibración establecida a través de un patrón de acetaldehído líquido.

Gramaje de preformas

Para las preformas Amcor cuenta con dos proveedores de preformas Incador e Intercia, para el muestro se utilizaron las preformas de Intercia solamente.

Adicionalmente, para el muestreo se analizarán cuatro tipos de gramaje de preformas: **16.7 g** utilizado para un tamaño de botella de 200 mL, **17.5 g** para un tamaño de botella de 330 mL, **38 g** para un tamaño de botella de 1 L y **50.7 g** para un tamaño de botella de 1.5 L.

Temperatura

La temperatura a utilizar es de 150 grados centígrados para todas las muestras.

% PCR en formulación de botellas PET

En el proceso de inyección del PET se realizarán variaciones en las formulaciones de las resinas de PET con 50%, 75% y 100% de PCR (Reciclado post consumo), al cual,

se le analizará el nivel de acetaldehído para determinar qué porcentaje de PCR puede ser admisible en las formulaciones de botellas PET sin incumplir con los niveles máximos establecidos para el acetaldehído (10 ppm) en botellas para productos de consumo humano.

SEGUNDO NIVEL

Selección de Métodos o instrumentos para recolección de información

Actualmente cromatografía es el nombre que se le da a un grupo de técnicas utilizadas en la separación de componentes de las mezclas y en la purificación de compuestos. Todos los sistemas de cromatografía contienen una fase estacionaria y una fase móvil. La cromatografía es un método de separación en el que los componentes a separar se distribuyen entre dos fases, una inmóvil (fase estacionaria), y otra móvil (fase móvil). A la distribución final de los componentes en función de su posición sobre el lecho estacionario se le denomina cromatograma. La fase estacionaria puede ser un sólido o un líquido que se queda fijo en la misma posición. Las sustancias que están en un sistema de cromatografía interactúan tanto con la fase estacionaria como con la fase móvil. La naturaleza de estas interacciones depende de las propiedades de las sustancias, así como también de la composición de la fase estacionaria. En el caso de la cromatografía de gases la fase móvil es un gas inerte que puede ser helio o nitrógeno y la fase estacionaria es un sólido. Este tipo de cromatografía debe ser en columna, ya que es la única forma de que la fase gaseosa se mantenga fluyendo y se encuentre confinada dentro del sistema (Rivera, 2016).

Para consultar el detalle del equipo de cromatografía y su funcionamiento estándar consulte el anexo 1 de este documento.

Técnica de análisis de datos

El procedimiento que será detallado a continuación corresponde al procedimiento estándar que utiliza Amcor para realizar el análisis y validación de concentración de acetaldehído de las preformas que utilizan para sus procesos de producción.

El primer paso es realizar la curva de calibración del equipo de cromatografía de gases Perkin Elmer Clarus 480, el cual, permitirá analizar los niveles de acetaldehído a diferentes formulaciones de resina virgen con PET Plástico post consumo. Posteriormente, se debe calibrar el equipo con las condiciones de presión, temperatura y tiempo de retención de la muestra adecuada para que los resultados sean los esperados. El método para generar la curva de calibración y las condiciones óptimas para la medición de los datos se encuentra en el anexo 2 del presente documento.

Se debe realizar la verificación de los cilindros de los gases para asegurar que no estén por debajo de los 300 psi. Adicional los reguladores se deben encontrar para el aire y nitrógeno en un rango entre 80 y 100 psi, para el caso del hidrógeno entre 60 y 80 psi.

Posterior a realizar la verificación es necesario abrir los cilindros de los gases, encender el headspace, el cromatógrafo de gases y el pc del software, verificando que los instrumentos no reporten ningún error. Se debe configurar el software de trabajo para la curva de calibración y esperar el tiempo de equilibrio del equipo para luego seleccionar el método de análisis de muestras de acetaldehído y esperar 60 minutos, el cual, es el tiempo de equilibrio del vial para poder realizar el análisis de las muestras.

Cuando el sistema se encuentre en equilibrio, se debe colocar el vial de 20 mL vacío en la balanza para tarar y posteriormente colocar la muestra molida de la preforma, asegurando que el vial esté completamente sellado y sin presencia de aire en la muestra, posteriormente, cargar las muestras a analizar y esperar dos minutos para que el cromatógrafo de gases pueda realizar su proceso de toma de datos.

Los resultados salen en mini -voltajes y posteriormente los datos son transformados por el software del cromatógrafo de gases en partes por millones.

Comparación de datos

Posteriormente a los dos minutos, se realiza una comparación de la curva de calibración frente a las muestras ingresadas al cromatógrafo de gases, se realiza una validación de los resultados de aquellas muestras que cumplen con el nivel de concentración de acetaldehído (máximo 10 ppm) y se selecciona la muestra que tenga el mayor porcentaje de PCR dentro de su formulación, ya que, será esa la muestra que cumple con la normativa y permite obtener el mayor porcentaje de PET reciclado post consumo en las botellas de Polietilén Tereftalato.

Análisis y discusión de resultados

Para el análisis de resultados se realizó la preparación de la muestra, se cortó la preforma y se insertó la preforma en el contenedor de muestras.

Ilustración 5 Preforma para muestreo



Posteriormente, se sumergió completamente la preforma en Nitrogeno líquido aproximadamente por un minuto, tal como se observa en la ilustración 6.

Luego de ello, se encendió el molino, se abrió la compuerta y se dejó caer la preforma para dejar moler durante 30 segundos (teniendo cuidado de no exceder este tiempo, para tener el tamaño de partícula adecuado para analizar la muestra en el cromatografo de gases.

Ilustración 6 - 7 Molienda de preforma



Posteriormente, se colocó la muestra en un vial para posteriormente pesar la muestra antes de llevar al cromatografo de gases.

Ilustración 8 Vial y septas para pesado



La muestra de preforma al pesarla debía estar en un rango de 0.480 g a 0,520 g.

Ilustración 8 Pesada de la muestra



Después de pesar la preforma se selló el vial completamente con ayuda de una pinza especial.

Ilustración 9 Cerrado del vial



Finalmente, se insertó el vial en la porta viales del cromatógrafo de gases para analizar la muestra.

Ilustración 10 Porta vial para análisis de muestra



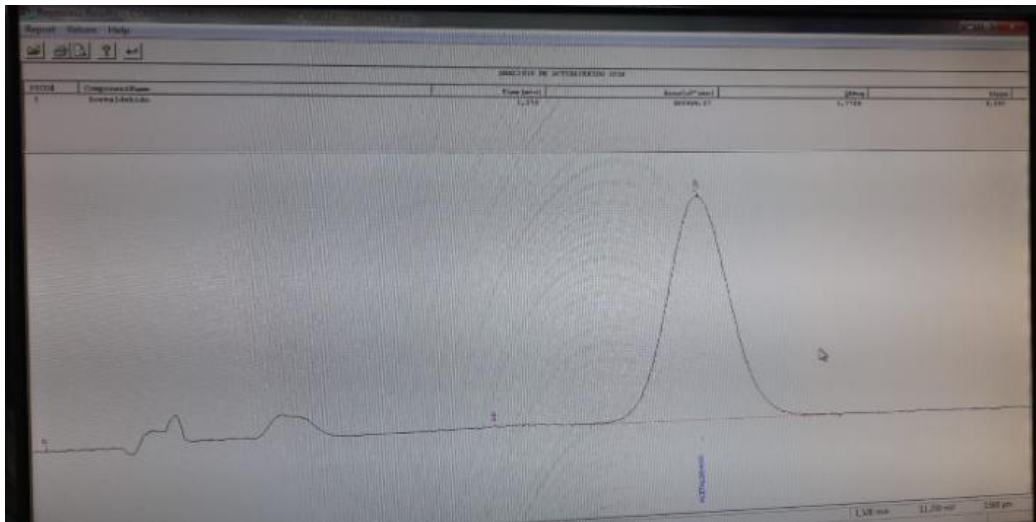
Se realizaron cinco muestreos, para diferentes tipos de gramaje de preformas con formulaciones de 50%, 75% y 100% de Polietileno Tereftalato reciclado por consumo, distribuidos de la siguiente manera:

Tabla 1 Muestreo de Preformas

GRAMAJE (g)	50%	75%	100%
16,7 (200 mL)		X	X
17,5 (330 mL)		X	
38 (1L)	X		
50,7 (1,5 L)			X

Preforma con Resina virgen al 100%

Ilustración 11 Concentración de acetaldehído con Resina virgen 100%

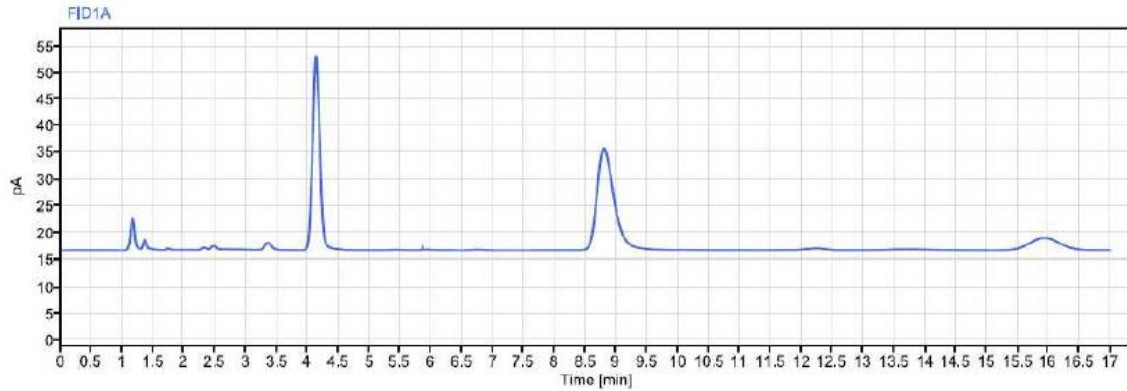


Con concentración de acetaldehído de 6.082 ppm

Preforma con Resina virgen y Polietileno Tereftalato al 50%

Para este muestreo y como se mencionó en la tabla 1, se tuvo en cuenta el gramaje de 38 g para una presentación de 1 litro.

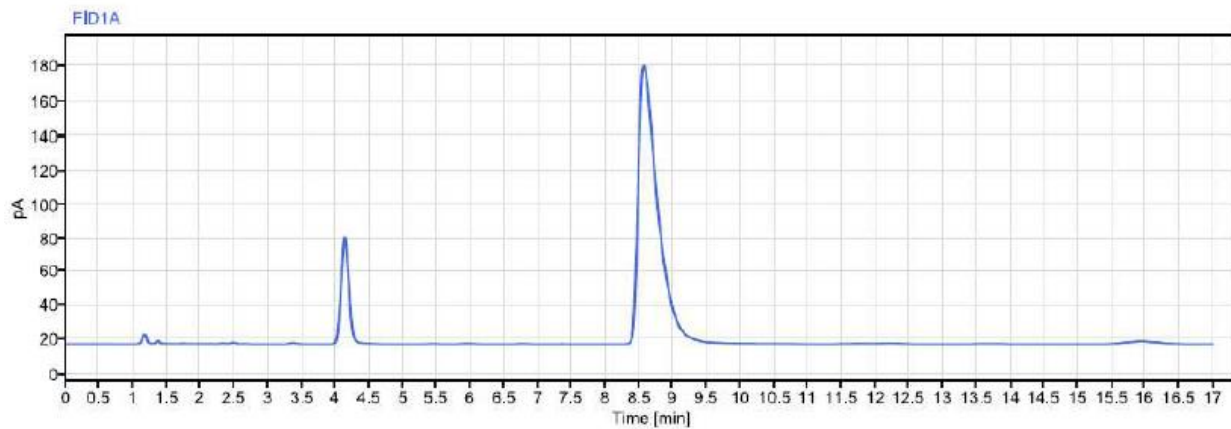
Ilustración 12 Concentración de acetaldehído con Polietileno Tereftalato al 50%



Signal:	FID1A			
Name	RT [min]	RF	Area	Concentration [ppm]
ACETALDEHIDO	8.72	172.322	182.369	8.365

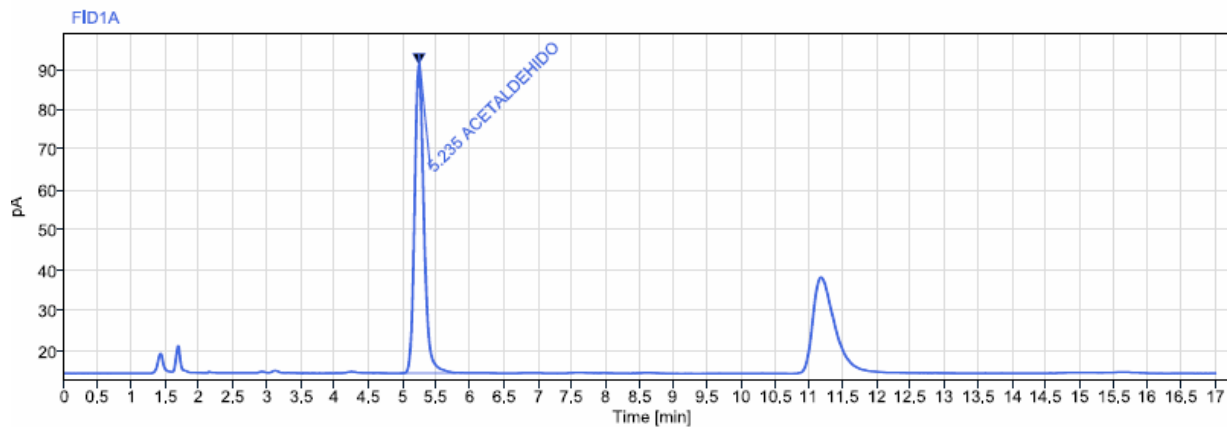
Preforma con Resina virgen 25% y Polietileno Tereftalato al 75%

Ilustración 13 Concentración de acetaldehído con Polietileno Tereftalato al 75% y gramaje de 16.7 g



Signal:	FID1A			
Name	RT [min]	RF	Area	Concentration [ppm]
ACETALDEHIDO	8.68	153.458	232.596	7.569

Ilustración 14 Concentración de acetaldehído con Polietileno Tereftalato al 75% y gramaje de 17.5 g

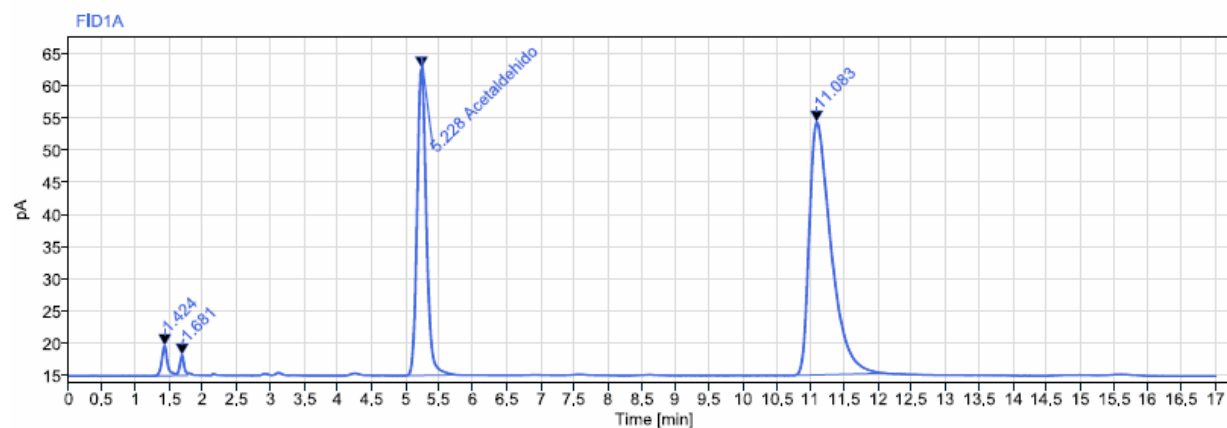


Signal: FID1A

Name	RT [min]	Area	Concentration [ppm]
ACETALDEHIDO	5.23	731.039	16.269

Preforma con Polietileno Tereftalato al 100%

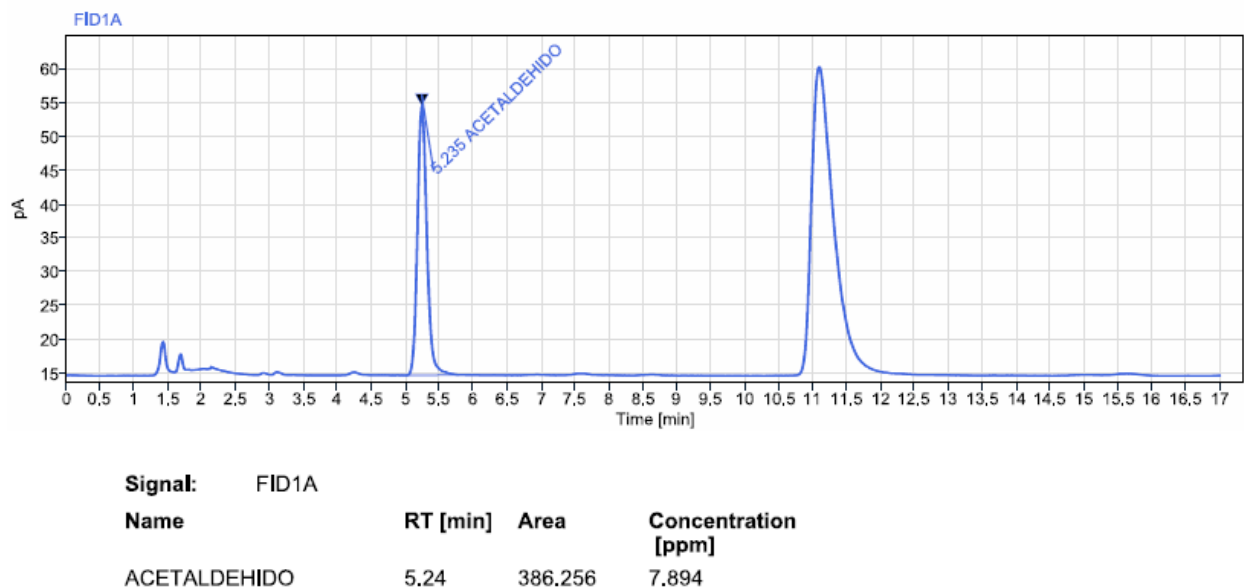
Ilustración 15 Concentración de acetaldehído con Polietileno Tereftalato al 100% y gramaje de 16.7 g



Signal: FID1A

Name	RT [min]	Area	Concentration [mg&L]
Acetaldehido	5.23	452.093	9.491

Ilustración 16 Concentración de acetaldehído con Polietileno Tereftalato al 100% y gramaje de 50.7 g



Frente a los resultados al realizar una comparación frente a los resultados de formulaciones independientemente del porcentaje de Polietileno Tereftalato, frente a la resina 100% virgen, la concentración de acetaldehído en ppm (partes por millón) se incrementa, esto puede verse reflejado en que, como se menciona dentro del documento, al realizar la preforma con una formulación de plástico post consumo es necesario fundir el polímero y hacerlo fluir bajo presión y temperatura en un molde, en el cual la pieza solidifica y al enfriarse la pieza moldeada bajo presión se obtienen las dimensiones y la forma deseada, este proceso, se realiza bajo una temperatura superior a los 260 grados centígrados lo cual, por reacciones inherentes al proceso se produce la reacción de producción de acetaldehído y dado que, el polímero ya había sido quemado para fabricar una preforma anterior, los niveles de acetaldehído incrementan.

La concentración de acetaldehído en ppm para las diferentes formulaciones oscila entre las 7 y las 9 ppm lo cual, sugiere que independientemente del porcentaje de formulación los niveles de acetaldehído cumplen con la normativa.

Al 100% de Polietileno tereftalato en la preforma se puede evidenciar que, aunque se cuente con un tiempo de residencia parecido dentro del proceso de muestreo, los niveles de acetaldehído en la muestra de 16.5 g son mayores que en muestras de 50.7 g lo cual.

Conclusiones

Con la recolección de información y análisis de datos se logró conocer el proceso de inyección de las preformas, identificar las variables que afectan frente a la generación de acetaldehído en el proceso de inyección, investigar acerca de los posibles riesgos a la salud del consumidor final si se exceden los niveles permitidos de acetaldehído en las botellas (10 ppm) y comparar los niveles de acetaldehído generado en diferentes formulaciones de polietileno tereftalato con resina virgen para las preformas.

Se concluye que el porcentaje máximo de PCR que se puede mezclar con resina virgen para cumplir con la normatividad frente a la concentración máxima permitida de acetaldehído depende del gramaje que se utilizó para la preforma, dado que, aunque en todos los porcentajes de formulación de PCR se cumplió con la normativa, al realizar la formulación al 75% pero con preforma de gramaje 17.5g se superó por más de 6 ppm la normatividad.

Aunque se concluye que las formulaciones pueden llegar hasta 100% Polietileno tereftalato para formular la preforma, es decir, sin necesidad de utilizar resina virgen, es necesario volver a realizar el muestreo de cromatografía de gases para el gramaje de 17.5 g que permita identificar si las condiciones de muestreo fueron atípicas o si efectivamente para este tipo de gramaje se está superando las 10 ppm de concentración de acetaldehído.

Por otro lado, frente a las variables que afectan directamente la generación del acetaldehído, frente a efectos de temperatura la concentración de acetaldehído en ppm para Hernández, J. (2013) a una temperatura de 260 grados centígrados en adelante la concentración oscila entre los 37 a 296 ppm, sin embargo, dentro del muestreo que se generó para las preformas con diferentes formulaciones las muestras no superaron las 16 ppm.

Aunque se encontraron varios artículos de los cuales se incluyó información acerca de la producción de acetaldehído, no se encontró información acerca de variación en las formulaciones de preformas con resina y plástico post consumo, lo que dificultó la comparación con otros autores. Las investigaciones relacionadas, estaban enmarcadas en parámetros de acetaldehído, pero más para controlar variables asociadas a procesos de producción.

Recomendaciones

Para futuros estudios se recomienda, realizar una validación que permita contrastar los niveles de acetaldehído en formulaciones de 50%, 75% y 100% pero con el mismo gramaje, dado que esto facilita el análisis de datos y se puede determinar la formulación óptima para no alterar la generación de acetaldehído.

Realizar varias veces el muestreo con las mismas formulaciones y con los mismos gramajes a fin de tener puntos de comparación entre varios muestreos con las mismas condiciones.

Realizar el muestreo con el mismo lote de preformas para evaluar completamente los niveles de acetaldehído bajo las mismas condiciones de fabricación de la preforma desde el proveedor.

Referencias

- Valderrama, M., Chavarro, L., Osorio, J. y Peña, C. (2018) Estudio dinámico del reciclaje de envases pet en el Valle del Cauca. *Revista Scielo*, 15(1), 67-74.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-44492018000100067
- World Economic Forum (2016). *The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics*. https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_New_Plastics_Economy.pdf
- ONU Medio ambiente (2018). *Plásticos de un solo uso: Una hoja de ruta para la sostenibilidad*. <https://www.unep.org/es/resources/informe/plasticos-de-un-solo-uso-una-hoja-de-ruta-para-la-sostenibilidad>
- Ministerio de Ambiente (s.f.). Responsabilidad extendida del productor. <https://economiacircular.minambiente.gov.co/index.php/transicion-a-la-economia-circular/responsabilidad-extendida-del-productor/#:~:text=La%20responsabilidad%20extendida%20del%20productor,hasta%20la%20disposici%C3%B3n%20final%20del>
- Hernández, J. (2013). Principio de funcionamiento del sistema de inyección y análisis para la comprensión de la influencia del defecto rebaba de preformas PET. *Revista Ingeniería UC*, 20(1), 42-52.
<https://www.redalyc.org/pdf/707/70732640006.pdf>

Gómez, J. (2016). *Diagnóstico del impacto del plástico – botellas sobre el medio ambiente: un estado del arte*.
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/10047/Gomez2016.pdf>

Rivera, X., Cobos, O. y Remes, J. (2016). Los efectos carcinogénicos del acetaldehído. Una visión actual. *Revista ElSevier*. 15(4), 231-239.
<https://www.elsevier.es/es-revista-gaceta-mexicana-oncologia-305-articulo-los-efectos-carcinogenicos-del-acetaldehido—S1665920116300530>

Beltrán, M., Marcilla, A. (2012). Tecnología de polímeros: Procesado y propiedades. Universidad de Alicante, pp. 87 – 89
https://books.google.co.ve/books?id=jxilUUn4_QAC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false

Prada, R., Acosta, J. (2017). El molde en el proceso de inyección de plásticos para el logro de objetivos empresariales. *Dimensión Empresarial*, 15(1), 169-182. <http://dx.doi.org/10.15665/rde.v15i1.1002>

Albarrán, J. (2014). Diseño y fabricación de un molde para inyección de plástico. o. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI).
Universidad Pontificia Comillas.
https://www.academia.edu/32277092/DISE%C3%91O_Y_FABRICACI%C3%93N_DE_UN_MOLDE_PARA_INYECCI%C3%93N_EN_PL%C3%81STICO

Juárez, D., Balart, R. (2012). Estudio y análisis del moldeo por inyección de materiales poliméricos termoplásticos. *Revista 3ciencias* 3(1), 1-14.
<https://www.3ciencias.com/wp-content/uploads/2012/11/1.estudio-y-analisis-del-moldeo-por-inyeccion-de-materiales-polimericos-termoplasticos.pdf>

Ceretti E, Zani C, Zerbini I, Guzzella L, Scaglia M, Berna V, Donato F, Monarca S, Feretti D. (2010) Comparative assessment of genotoxicity of mineral water packed in polyethylene terephthalate (PET) and glass bottles. *ScienceDirect* 44 (5), 1462-1470.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135409007039>

Dabrowska, A., Borcz, A. (2003). Aldehyde contamination of mineral water stored in. *Food Additives and Contaminants*, 20(12), 1170 - 1177.
<https://doi.org/10.1080/02652030310001620441>

Roede, J. (2015). Hepatotoxicity of Reactive Aldehydes. *ScienceDirect* 9 (1), pp. 581 – 594. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801238-3.02113-9>

Cobos, R (2016). El polietilén tereftalato (PET) como envase de aguas minerales. *Boletín Sociedad española de Hidrología médica*. 31(2), pp. 179– 190.
[http://hidromed.org/hm/images/pdf/0212.BSEHM%202016_31\(2\)179-190_Cobo-RR.pdf](http://hidromed.org/hm/images/pdf/0212.BSEHM%202016_31(2)179-190_Cobo-RR.pdf)

IARC (1999) Acetaldehyde. *IARC Monogr. Eval. Carcinogen. Risks Hum.*, 71, 319–335.

https://publications.iarc.fr/_publications/media/download/3806/91bc8f720933ccd0fb5eb2032117ec1e3bfa2905.pdf

Welle, F. (2018). Migration of Acetaldehyde From PET Bottles Into Natural

Mineral Water. ScienceDirect, Reference module in Food Science pp. 1-8 <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22436-0>

Juárez (2017). Panorama de las botellas PET en el mercado de bebidas.

<https://thefoodtech.com/insumos-para-empaque/panorama-de-la-botellas-pet-en-el-mercado-de-alimentos/>

Cobos (2016). Los efectos cancerígenos del acetaldehído.

<https://doi.org/10.1016/j.gamo.2016.07.007>

González, J. (2010) Técnicas y métodos de laboratorio clínico. 3era edición.

Pp. 197 – 210

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9788445820292500148>

Bolívar, G. (2018). Cromatografía de gases: cómo funciona, tipos, partes, usos.

Lifeder. Recuperado de <https://www.lifeder.com/cromatografia-de-gases/>

Douglas, A; Donald, M; James, H; Stanley, R. (2015). 32 cromatografía de gases. En Fundamentos De Química Analítica (Novena edición, 887-892) CENAGE Learning. <https://www-ebooks7-24-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/?il=798&pg=907>

Abelló L. (2022). Detector de ionización de llama (FID). Ficha

https://www.linde-gas.es/es/images/Cromatograf%C3%ADa%20de%20Gases%20Ionizaci%C3%B3n%20y%20Termodin%C3%A1mica%2019007-01_tcm316-120153.pdf

Villa L [Lidia villagomez]. (2020). Cromatogramas [Video]. YouTube.
https://www.youtube.com/watch?v=2JTHTuVS_bl&ab_channel=lidiavillagomez

Torres J, Arias H (2016). Cromatógrafo de gases - Funcionamiento sistemático básico. [Video]. YouTube.
https://www.youtube.com/watch?v=atTT5Rztnog&ab_channel=CANALDELQFB

Rivera, C.; Roman, L (2016). Guía sobre principios básicos de cromatografía y sus aplicaciones.
https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/4694/guia_cromatograf%EDa.pdf;jsessionid=61D205F95EAC5BB0D6BB4778143EC34E?sequence=1

I, Cretu, M. Garranzo, M. Mongue (2018), Estudio de la migración de compuestos químicos en las aguas embotelladas. Microsoft Word - Bol Soc Esp Hidrol Med, 2018 (Julio-Diciembre), Vol. 33, Núm. 2, 173-189. 0572. Cretu I. Migración.doc (hidromed.org)

Baumjohann N, Harms D. (2015) Development of an LC-MS/MS method for studying migration characteristics of acetaldehyde in polyethylene terephthalate (PET)-packed mineral water. Food Addit Contam Part Chem Anal Control Expo Risk Assess.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26258902/>

Díaz, J.; Parra, P. (2020) Evaluación del incremento de polietilentereftalato amorfo obtenido por reciclaje mecánico al proceso de inyección y soplado de botellas no retornables. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8112/1/6151528-2020-III-IQ.pdf>

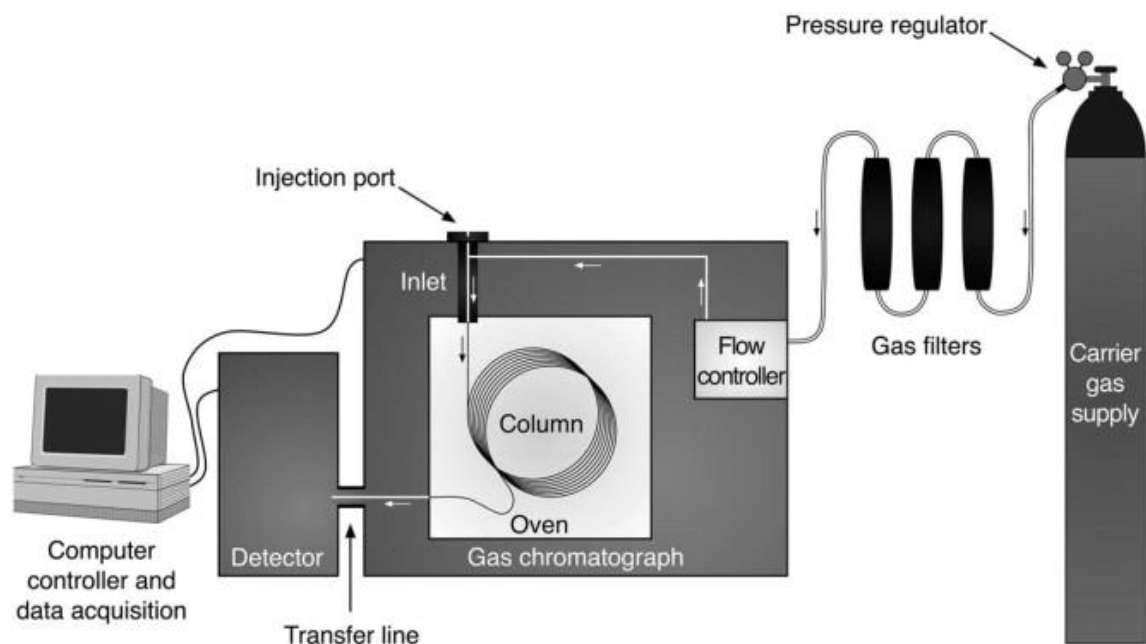
Arrazola, A. (2014) Análisis de la degradación térmica mezclas de Polietilén tereftalato reciclado proveniente de botellas de bebidas carbonatadas de consumo popular en la ciudad de Cartagena. Revista Colombiana de materiales Vol. 5 pp. 93 – 99. https://www.researchgate.net/publication/303988267_ANALISIS_DE_LA_DEGRADACION_TERMICA_MEZCLAS_DE_POLI_TEREFTALATO_DE_ETILENO_RECICLADO_R-PETPET_PROVENIENTE_DE_BOTELLAS_DE_BEBIDAS_CARBOATADAS_DE_CONSUMO_POPULAR_EN_LA_CIUADAD_DE_CARTAGENA

ANEXO 1

Cromatógrafo de gases

La cromatografía de gases es un proceso de separación de componentes que aprovecha las propiedades polares de las partículas de una sustancia, este método es eficiente especialmente eficiente en compuestos con puntos de ebullición similares, a diferencia de la destilación convencional (Bolívar, 2018).

Ilustración 17 Estructura del cromatógrafo de gases



Adaptado de: Stauffer, E.; Dolan, J.; Newman, R. (2008). Gas Chromatography – Mass Spectrometry. Pp. 235 – 293
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780126639711500129>

1. Cilindro de gas: También denominado gas portador o acarreador que generalmente es He, Ar o N ya que son gases inertes y económicos. La función de este gas es la de transportar los componentes de la muestra y crear una matriz correcta para el detector (Torres, 2016).
2. Regulador de gas: permite la medición precisa del flujo de gas que está ingresando en el inyector (Torres, 2016).

3. Inyector de muestra: Es donde ingresa la muestra de forma inmediata, no continua, a través del septum por una jeringa hipodérmica (Torres, 2016).
4. Inyector incorporado: Este está formado por un bloque metálico aislado térmicamente que se compone de un sistema de calentamiento y su respectivo termostato. Una vez inyectada la muestra esta es inmediatamente vaporizada para mezclarse con el gas portador (Arias, 2016).
5. Columna cromatográfica: Aquí es donde ocurre la separación de los compuestos del gas, esto ocurre de acuerdo a la fase estacionaria y a la polaridad de las partículas en cuestión posteriormente ocurre la fase móvil, en la cual se dirigen las partículas ya separadas hacia el detector (Torres, 2016).
6. Detector: Contiene un quemador donde el efluente es mezclado con hidrógeno y aire, posteriormente ocurre un encendido eléctrico que es amplificado para ser monitorizado, esto se basa en la pirolización, en este proceso la mayoría de compuestos orgánicos producen iones y electrones, de esta forma se recolecta la señal entre la punta del quemador y un electrodo colector (Linde, 2022).
7. Amplificador: Su función es incrementar la señal eléctrica obtenida por el electrodo colector, para transmitirla al software especializado de detección (Torres, 2016).
8. Cromatograma: Es la gráfica resultante luego del procesamiento de las señales obtenidas, se basa en un software especializado que forma la respuesta del detector. El cromatograma es representado por curvas gaussianas que nos brindan información cuantitativa (cantidad) y cualitativa (identificación) (Villa, 2020).

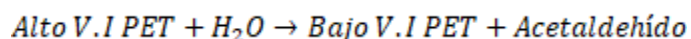
ANEXO 2

Equipo de cromatografía

Para este caso, el equipo a utilizar es el cromatógrafo de gases Perkin Elmer Clarus 480, ya que para analizar la concentración de acetaldehído presente en las muestras con diferentes porcentajes de PET PCR, la cual, es la variable que permitirá determinar el porcentaje máximo admisible de PCR en la formulación de botellas PET, se hará uso de la cromatografía de gases, dado que es un proceso físico que permite que los componentes de una mezcla se separen por la distribución entre una fase móvil y una fase estacionaria. Durante el proceso de cromatografía de gases, la fase móvil transporta el componente a lo largo de la columna que contiene la fase estacionaria (González, 2010).

Antes de la verificación de los niveles de acetaldehído en ppm, es necesario garantizar que las condiciones en el proceso de secado/inyección sean las establecidas para garantizar que no se incremente la generación de acetaldehído en estos procesos, por lo cual, se hace necesario que el proceso de secado tenga un tiempo estimado de 7h de residencia y que las muestras de preformas que serán llevadas a análisis mediante cromatografía de gases, estén por debajo de 50 ppm de humedad, dado que el Polietilén tereftalato es higroscópico, es decir, que absorbe humedad con mucha facilidad y cuando es sometido a procesos con alta temperatura se produce una reacción de hidrólisis (Díaz, 2020), es decir, que las cadenas de PET se rompen en presencia de agua y altas temperaturas, esto puede ser observado en la siguiente reacción:

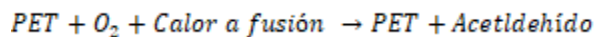
Ecuación 4



Siendo V.I la viscosidad intrínseca del Polietilén Tereftalato.

Las consecuencias de la hidrólisis, son la generación de acetaldehído por la reacción entre los extremos de las cadenas rotas y el agua o el oxígeno presentes en el Polietilén tereftalato fundido. Asimismo, durante el proceso de inyección las condiciones necesarias de temperatura deben estar en un rango entre 292°C y 305°C máximo, estos niveles no se pueden sobrepasar, porque el acetaldehído como lo hemos venido mencionando a lo largo de este documento, aumenta en forma exponencial con temperaturas de fusión mayores porque se produce degradación térmica del Polietilén Tereftalato (Arrazola, 2014), esto puede ser observado de la siguiente manera:

Ecuación 5



Posterior al proceso de inyección las preformas de diferentes formulaciones (50%, 75% y 100% de PCR) deben ser molidas y recogidas en un Petri para 250 mg de preforma molida que deberá ser colocada dentro de un vial con ayuda de una espátula, este proceso se debe hacer para cada una de las muestras que se necesita analizar.

Curva de calibración

Se debe generar una curva de calibración, de acetaldehído en el equipo de cromatografía de gases antes de introducir las muestras, la curva de calibración se realiza con un patrón de acetaldehído líquido proveniente de Estados Unidos y que la empresa Amcor Rigid Packaging provee para esta investigación. Con el patrón de acetaldehído se deben tomar cinco viales y tomar los siguientes volúmenes:

Tabla 2 Volúmenes para curva de calibración de Cromatógrafo de gases

Etiqueta Vial	STD 1000 ppm		STD 500 ppm	
	uL Std	Concentración ppm	uL Std	Concentración ppm
Vial # 1	1	2	1	1
Vial # 2	2	4	2	2
Vial # 3	4	8	4	4
Vial # 4	6	12	6	6
Vial # 5	8	16	8	8

Utilizando la ecuación 1,2 y 3, se puede obtener la curva de calibración a través de los volúmenes adicionados en el equipo.

Para calibrar el equipo de cromatografía de gases es necesario determinar la concentración de acetaldehído en uL estándar adicionado a partir del estándar de 1000 ppm, para esto se debe proceder de la siguiente manera:

Ecuación 1

$$\text{uL STD} \times \frac{1 \text{ ml}}{1000 \text{ uL}} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ L}} = \text{mg STD}$$

Ecuación 2

$$\text{g muestra} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}} \times = \text{Kg muestra}$$

Ecuación 3

$$\frac{\text{mg STD}}{\text{Kg muestra}} = \text{ppm}$$

Reemplazando las fórmulas con los valores se puede obtener la concentración de acetaldehído de acuerdo con el volumen adicionado, teniendo la curva de calibración, y realizando el proceso de verificación frente a los parámetros establecidos que debe tener el equipo para que la desviación sea lo más cercano a uno y esté por encima de

0.95, se puede proceder a realizar la medición del acetaldehído en las muestras de preformas con diferentes formulaciones.

Condiciones básicas del cromatógrafo de gases

Las condiciones que serán mencionadas a continuación son condiciones estándar que utilizan dentro de la empresa Amcor Rigid Packaging y que fueron proporcionadas con fines académicos para la parametrización del cromatógrafo de gases Perkin Elmer Clarus 480 con las siguientes condiciones cromatográficas:

El porcentaje de humedad relativa del medio ambiente debe estar entre 20% y 80% para que el equipo funcione correctamente, adicionalmente, se debe asegurar como fase móvil (gas Carrier) Nitrógeno líquido, hidrógeno UHP y aire sintético, los cuales no pueden estar a una presión menor a 300 psi dado que, esto podría generar un arrastre de impurezas y por ende inestabilidad en la línea base a la hora de analizar la información obtenida.

Temperatura del horno: 120°C – 190°C

Temperatura de la columna: 150°C

Temperatura detector A -FID: 150°C

Tiempo de retención: 2 min