

**DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES MÁS FAVORABLES PARA EL RECICLAJE
MECÁNICO DE EXCEDENTES INDUSTRIALES DEL POLIETILEN TEREFALATO EN LA
EMPRESA IBERPLAST S.A.S.**

JENNY MARCELA LIZARAZO CASTELLANOS

Maestría en Diseño y Gestión de Procesos- Énfasis en Procesos Químicos

Facultad de Ingeniería

UNIVERSIDAD DE LA SABANA

Chía

2018

**DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES MÁS FAVORABLES PARA EL RECICLAJE
MECÁNICO DE EXCEDENTES INDUSTRIALES DEL POLIETILEN TEREFALATO EN LA
EMPRESA IBERPLAST S.A.S.**

JENNY MARCELA LIZARAZO CASTELLANOS
Química

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
Magister en Diseño y Gestión de Procesos**

Director: Dr. Manuel Fernando Valero Valdivieso

Maestría en Diseño y Gestión de Procesos- Énfasis en Procesos Químicos
Facultad de Ingeniería
UNIVERSIDAD DE LA SABANA
Chía
2018

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	4
INTRODUCCIÓN	5
JUSTIFICACIÓN	6
OBJETIVOS	7
CAPÍTULO 1	8
Estado del arte	8
CAPÍTULO 2	10
MATERIALES Y EQUIPOS	10
MÉTODOS	10
Obtención del PET reciclado	10
Caracterización de la resina, preforma y botella	10
Análisis estadístico	12
Análisis de costo beneficio	12
CAPÍTULO 3	13
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	13
Obtención de PET reciclado	13
Caracterización del PET reciclado	13
Resina	13
Preforma y botella	16
Análisis estadístico	17
Análisis de costo beneficio	20
CONCLUSIONES	23
AGRADECIMIENTOS	24
BIBLIOGRAFÍA	25

RESUMEN

El consumo de polietileno tereftalato (PET) ha aumentado en los últimos años ya que se usa en la fabricación de fibras y botellas para bebidas. Durante su procesamiento se generan excedentes industriales que se pueden reciclar mecánicamente. En la empresa Iberplast S. A. S. se producen aproximadamente 400 Ton de excedentes industriales en un mes; de estos excedentes el reintegro al proceso en algunos meses es alto y en otros bajo. El PET reciclado es utilizado mezclado con material original en los mismos procesos. El objetivo de este trabajo fue analizar el aprovechamiento de estos excedentes y encontrar las mejores condiciones de operación del cristalizador de esta empresa, modificando la temperatura y tiempo de residencia con el fin de obtener un PET reciclado que tenga propiedades mecánicas y térmicas similares a las del PET original. El material reciclado se caracterizó teniendo en cuenta las reacciones de hidrólisis y descomposición térmica, mediante la viscosidad intrínseca, la concentración de acetaldehído, el análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC). Por último, se realizó un análisis de costos con el fin de evaluar la reducción en costos de compra de materia prima debido al mayor consumo de PET reciclado mecánicamente obtenido en el cristalizador. Este PET reciclado presentó una viscosidad intrínseca inferior en un 20% respecto al valor del material original. El material obtenido puede utilizarse mezclado con material original en la fabricación de nuevas botellas de volumen de 1 L a 1,5 L. Para la empresa Iberplast los resultados del estudio permitieron identificar los niveles más bajos, 165°C y 3 horas de residencia, en el cristalizador como las mejores condiciones de operación para el reciclaje de excedentes industriales de PET. En el análisis costo beneficio se determinó que el consumo de PET reciclado favorece económicamente a la empresa ya que disminuye la cantidad de PET original comprado y su costo en un 5%.

Palabras clave: polietileno tereftalato (PET), cristalizador, viscosidad intrínseca, concentración acetaldehído, TGA-DSC.

INTRODUCCIÓN

El Polietilen tereftalato (PET) es un poliéster termoplástico con buenas propiedades físicas y químicas, resistencia mecánica, transparente, estable térmicamente, con propiedades de barrera y buena flexibilidad [1] [2]. Otra característica es su bajo costo y la variedad de aplicaciones desde fibras hasta botellas de bebidas, películas, aplicaciones de empaque, sustratos de recubrimientos magnéticos y aplicaciones biomédicas [1]. Desde hace más de 20 años ha sido utilizado principalmente como materia prima en la fabricación de botellas para diferentes productos con ventajas como su bajo peso y mayor resistencia comparada con el vidrio; además de las propiedades de barrera para el oxígeno, por lo tanto, ha llegado a sustituir al vidrio en varias de las aplicaciones de empaque [2].

En la literatura se encuentra reportado acerca del reciclaje del material postconsumo, lo que favoreció la creación de empresas dedicadas a llevar a cabo esta tarea [3] [4]. En el material preconsumo, que son los excedentes industriales, se ha reportado que su reciclaje es limpio, debido a la procedencia del residuo industrial libre de contaminantes. El residuo o excedente reciclado ha sido mezclado con material virgen para asegurar la calidad del producto o ha sido usado como un material de segundo grado [5]. Se han publicado los métodos de reciclaje que son: **a.** el re-uso, donde se reutiliza en moldeo en sí. **b.** el reciclaje mecánico, que se utiliza como material agregado después de la peletización. **c.** el reciclaje químico, donde es depolimerizado y es utilizado como materia prima; y **d.** térmico, que se usa como combustible [6]. En patentes, por ejemplo, se ha presentado información acerca del reciclaje mecánico de PET proveniente de espuma, también el uso de PET postconsumo pero con un método de reciclaje químico [7] [8].

El reciclaje de Polietilen tereftalato (PET) en Colombia se ha realizado en mayor medida por métodos químicos y con material postconsumo, la resina ha sido reintegrada a los procesos de fabricación de material de empaque como botellas para productos alimenticios con aprobación FDA, *Food and Drug Administration* [9] [10]. Los excedentes industriales (material preconsumo) no han estado en contacto con producto u otros materiales contaminantes, por tal razón no requieren de un reciclaje por el método químico y los ciclos de lavado son menores [5]. El reciclaje mecánico ha sido el utilizado durante varios años para el material preconsumo en una empresa transformadora de PET. Este tipo de reciclaje involucra el molido del material PET, la obtención de gránulos “pellets” y la policondensación de estado sólido. Este último proceso ha sido utilizado para ayudar a mejorar algunas propiedades fisicoquímicas y mecánicas del material [3] [6] [11], con la modificación de la temperatura y el tiempo de residencia; ya que altos pesos moleculares son requeridos para aplicaciones como la fabricación de botellas [1]. El rango promedio del peso molecular para la aplicación de botellas va de 24.000 a 36.000 g/mol, que corresponde a una viscosidad intrínseca entre 0.75 y 1.00 dL/g. Siendo el grado estándar de 0.80 dL/g [5]. En la industria existe un equipo similar al policondensador de estado sólido que es el cristalizador; de éste no hay reportes en la literatura. Sin embargo, también permite modificar la temperatura y tiempo de residencia del material, aunque sin vacío.

Por lo tanto, en este trabajo se analizó el proceso del reciclaje mecánico de PET preconsumo, que corresponde a los excedentes industriales procedentes de la fabricación de preforma en el proceso de moldeo por inyección; determinando las condiciones más favorables de operación en un cristalizador perteneciente a una empresa colombiana. En el cristalizador se toman como factores la temperatura y el tiempo de residencia del material PET y se modifican en un nivel alto y otro bajo; las variables de respuesta son la viscosidad intrínseca y la concentración de acetaldehído que están asociadas al peso molecular del polímero y son producto de las reacciones de descomposición térmica e hidrólisis que sufre el material durante su procesamiento [11]. La concentración de acetaldehído es una de las variables ya que ayuda a determinar si la aplicación final del material es viable en botellas para almacenar alimentos. El PET obtenido mediante el reciclaje mecánico en las

diferentes condiciones se sometió a un análisis termogravimétrico para determinar si existen diferencias significativas entre las muestras y sus etapas de degradación.

JUSTIFICACIÓN

En la empresa Iberplast se cuenta con un equipo cristalizador con fines similares al policondensador de estado sólido. Y no se han estudiado las condiciones favorables de operación de este equipo involucrado en el reciclaje mecánico de excedentes industriales de PET; que, desde el punto de vista industrial, ha sido el método de reciclaje más favorable debido a su bajo costo y confiabilidad [12]. También se han reportado ventajas de utilizar el reciclaje mecánico comparado con el químico como la simplicidad, los requerimientos de baja inversión, utilización de equipos establecidos, flexible en términos de volumen de almacenamiento y un bajo impacto ambiental [5]. Se desean identificar las condiciones más favorables de operación del cristalizador y analizar el proceso de reciclaje mecánico que se realiza en este equipo; ya que para la empresa Iberplast es un tema desconocido y hasta ahora no estudiado para ellos, que favorece su proceso productivo de reciclaje de excedentes industriales de PET. La preforma se fabrica utilizando un 5% de PET reciclado y 95% de PET original. Al aumentar el consumo de PET reciclado se pueden disminuir costos debido al almacenamiento por acumulación y en la compra de PET original, que en la actualidad es cerca de 2500 Ton/mes.

Al determinar cuáles son las condiciones más favorables para reciclar mecánicamente PET postindustrial, se mejorarían los procesos operativos y productivos donde este material es reintegrado. También contribuiría a reducir los costos por reproceso, acumulación y en gran escala el impacto ambiental, se mejoraría la calidad de los productos donde una de sus materias primas es este PET reciclado.

En este trabajo se analizó el proceso del reciclaje mecánico de PET preconsumo utilizando el cristalizador y tomando como factores la temperatura y el tiempo de residencia del material; las variables de respuesta son la viscosidad intrínseca y la concentración de acetaldehído que influyen en el procesamiento del material y el producto final, además están asociadas al peso molecular del polímero y son producto de las reacciones de descomposición térmica e hidrólisis que sufre el material durante su procesamiento [11].

Para evaluaciones futuras se puede establecer el análisis y caracterización de los productos fabricados con un mayor porcentaje de PET reciclado en su formulación, evaluando diferentes porcentajes y determinando el impacto en la calidad del producto, por ejemplo si influye en la retención de CO₂ en el tiempo, resistencia de la botella a la compresión y estabilidad térmica.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Determinar las condiciones favorables de operación para realizar el reciclaje mecánico del Polietileno tereftalato postindustria en la empresa Iberplast S.A.S. a partir de la modificación de la temperatura y tiempo de residencia en el cristalizador para obtener una reducción en los costos.

Objetivos específicos

- Caracterizar el material PET reciclado mecánicamente teniendo en cuenta las reacciones de descomposición térmica e hidrólisis.
- Identificar la influencia del PET reciclado mecánicamente que es reintegrado al proceso productivo evaluando la calidad de los productos.
- Determinar los beneficios de la modificación del proceso de reciclaje a nivel productivo, de calidad y ambiental en la empresa.

CAPÍTULO 1

Estado del arte

En el reciclaje mecánico del PET el policondensador de estado sólido (SSP) es una parte importante en el proceso ya que, parámetros como la temperatura, vacío y el tiempo de residencia del material influyen en las propiedades del material final como el peso del polímero; el tiempo de residencia inicialmente se reporta entre 6 horas y 20 horas, las temperaturas entre 180°C y 220°C dependiendo de la viscosidad intrínseca deseada [2].

Las botellas de bebidas postconsumo pueden ser recicladas mecánicamente y mezcladas con PET virgen, otros polímeros o fibras para su reproceso según las propiedades deseadas, durante el reciclaje, el polímero se degrada y se reduce el peso molecular, la viscosidad intrínseca decrece a medida que se aumentan los ciclos de reciclaje y la cantidad de PET reciclado reintegrado al proceso [3].

El reproceso del PET por extrusión, en el cual se obtienen gránulos produce una degradación en las cadenas, que se hace evidente en las propiedades mecánicas como la tensión y el impacto. Por este motivo en el proceso industrial de reciclaje de PET postconsumo se incorporan reacciones de extensión de cadena o polimerización de estado sólido para superar la caída del peso molecular [4].

La temperatura es uno de los principales parámetros que influye en el policondensador de estado sólido para incrementar el peso molecular, según lo reportado temperaturas de 220, 230 y 240°C con un tiempo de residencia de 4 horas han aumentado la viscosidad intrínseca de 0.35dL/g a 0.68, 0.82 y 0.89dL/g respectivamente. Por lo tanto a temperaturas cerca del punto de fusión del PET la movilidad macromolecular es mas alta, también a bajas temperaturas hay una degradación continua de los grupos carboxilo finales [1].

El reciclaje de PET postindustrial o excedentes industriales tiene ventajas, ya que este se encuentra limpio y la composición del polímero es conocida; por lo tanto no necesita ser recolectado, seleccionado y lavado. Públicamente no se encuentran datos acerca de la cantidad de residuos de PET postindustrial que se generan, esta información la manejan internamente en las compañías. El PET postindustrial al igual que el postconsumo sufren una degradación termo-mecánica causada por el reproceso; esto genera una reducción del peso molecular del polímero y sus propiedades. Las alternativas planteadas para mejorar las consecuencias del reproceso son la policondensación de estado sólido y la adición de extendedores de cadena [13].

También se reportan acerca del reciclaje de residuos plásticos como el PET mezclados con otros materiales, polietileno de alta y baja densidad; el reciclaje mecánico ha sido el más llamativo por su beneficios económicos y ambientales. Sin embargo es un reciclaje complejo para la mezcla completa [14].

Los residuos de PET han sido estudiados en mezclas con materiales de construcción como el concreto, con resultados de reducción de la resistencia a la compresión cuando se usa en cantidades inferiores al 15% [15].

En la literatura revisada y mencionada a lo largo del estado del arte trata acerca del reciclaje en material postconsumo en su mayoría y utilizando un policondensador de estado sólido o métodos químicos. El material que se va a utilizar en el proyecto es postindustrial y el equipo es un cristalizador. Las condiciones de proceso pueden ser similares para ambos materiales, o pueden cambiar; por lo tanto el aporte de este proyecto es conocer las mejores condiciones de operación realizando todo el proceso de reciclaje en una empresa transformadora de PET en Colombia.

La información que se tiene acerca del cristalizador UNA-DYN® XTLR-300 y su funcionamiento se toma de la ficha técnica. El equipo fue diseñado para cristalizar el material amorfo con un rendimiento continuo, el material se agita lentamente para prevenir la aglomeración y minimizar la degradación del producto. La capacidad del cristalizador son 300 kg/hora. En la Figura 1 se muestra un diagrama general del equipo suministrado por la empresa Iberplast.

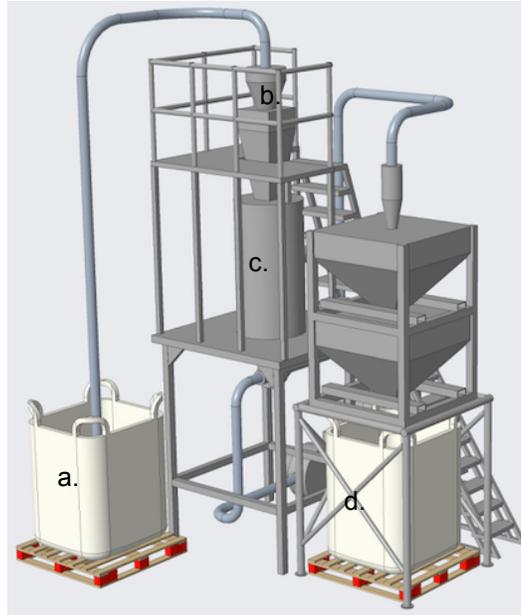


Figura 1. Cristalizador para reciclaje mecánico de PET, **a.** PET granulado o peletizado **b.** Tolva de alimentación. **c.** Cámara de mezclado. **d.** PET reciclado

El PET granulado o en forma de “pellets” ingresa por la parte superior del cristalizador a la cámara de mezclado, allí se agita y permanece el tiempo programado de residencia con un flujo de aire caliente según la temperatura programada. La salida del material se encuentra en la parte inferior, desde allí el material se alimenta a dos tolvas para enfriarlo y finalmente almacenarlo para uso en el proceso de inyección de preforma.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y EQUIPOS

Materiales

Los excedentes industriales de PET se tomaron del proceso de inyección de preforma en una máquina propiedad de la empresa colombiana Compañía Iberoamericana de Plásticos Iberplast. Las resinas utilizadas para el reciclaje mecánico fueron mezclas no cuantificadas de resinas como Polyclear®1101 de Indorama Ventures (México) y Laser® MB912 de Dak Resinas América (México); ambas con una viscosidad intrínseca inicial de 0,84 +/- 0,02 dL/g, este valor fue establecido por el proveedor; las resinas fueron fabricadas para uso en la aplicación de botellas no retornables.

Equipos

La preforma y los excedentes se obtienen de un proceso de moldeo por inyección en una máquina Husky® HyPET 400 (Canadá). El PET es previamente secado a 165°C por un tiempo entre 5 y 6 horas. La temperatura de procesamiento utilizada en el tornillo extrusor fue de 285°C, con un ciclo de enfriamiento entre 9 y 12 segundos. La misma máquina es utilizada para obtener la preforma con 5% de PET reciclado y 95% PET original.

Para el reciclaje mecánico se utilizó un molino y peletizador EREMA INTAREMA® (Suiza) con un sistema magnético para evitar daños en el equipo y contaminación del producto. También se usó el cristizador de circuito cerrado UNA-DYN® XTLR-300 (USA) en el que se modificaron temperaturas y tiempo de residencia, allí el material amorfo se cristaliza mediante el calentamiento. Este equipo en particular presenta una limitante en la temperatura ya que no supera los 200°C, es la máxima temperatura de operación; también debido a modificaciones en su diseño el PET se aglomera a temperaturas superiores a 180°C. Las condiciones usadas antes del proyecto son 165°C y 3 horas de residencia que se incluyeron en las evaluadas para aportar información al proceso.

MÉTODOS

Obtención del PET reciclado

Los excedentes de PET se procesaron mecánicamente en un molino y peletizador EREMA INTAREMA® (Suiza), el material obtenido se llevó al cristizador UNA-DYN® XTLR-600 (USA) a las condiciones presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones para el reciclaje mecánico de excedentes industriales en el cristizador

Factor	Nivel alto	Nivel bajo
Temperatura (°C)	175	165
Tiempo residencia (h)	4	3

Caracterización de la resina, preforma y botella

El muestreo del material en la fase de obtención de PET reciclado se realizó después de 30 minutos de producción y se midieron por triplicado. En la fabricación de la preforma con PET reciclado se tomaron muestras por triplicado después de 15 minutos de producción.

Se determinó la viscosidad intrínseca (VI) del material utilizando un indexador de fusión Dynisco® LMI4000 (USA) que según la literatura fue objeto de investigación con resultados similares al método del viscosímetro Ubbelohde y la mezcla de fenol y tetracloroetano [16]. El indexador de fusión se utilizó con una temperatura de 285°C y tiempo de precalentamiento de 60 s como condiciones de operación del equipo.

Para la determinación de la concentración de acetaldehído producido durante la obtención, secado y procesamiento del PET reciclado [11] [17] se utilizó un cromatógrafo de gases Perkin Elmer Clarus® 580 (USA) con detector de ionización de llama (FDI), con una columna capilar Elite Q PLOT 30 m 0,53 m x 20 µm y Headspace Perkin Elmer Turbomatrix 40 (USA). El gas de arrastre utilizado fue N₂ grado analítico 5,0 del proveedor Oxígenos de Colombia (Colombia); se siguieron los parámetros establecidos en la norma ASTM F2013 que indicó la preparación de la muestra en forma de resina o preforma utilizando N₂ líquido y un molino pulverizador para un tamaño de muestra inferior a 1000µm; también las temperaturas de los hornos, los tiempos de análisis y precalentamiento de las muestras [18] que se presentan en la Tabla 2. El límite de detección para el método utilizado es de 0,0265µg [19].

Tabla 2. Condiciones para el análisis de concentración de acetaldehído

Condiciones Cromatográficas	
Muestreador automático "Head-space"	Horno: 150°C, 60 min
	Línea de transferencia: 170°C
Cromatógrafo de gases	Horno: 90°C, isotérmica, 8min
	Inyector: 250°C
	Relación Split: 2
	Detector: FID, 250°C
Fase móvil	N ₂
	Flujo en columna: 12,2 mL/min
	Flujo en detector: 20 mL/min

El análisis de las propiedades térmicas de las cuatro muestras de PET reciclado obtenido en el cristizador y una más: PET Original se estudiaron utilizando Análisis termogravimétrico (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), se utilizó un equipo Mettler Toledo TGA/DSC1 1100 SF (USA). Se pesaron muestras de 12 mg (±2 mg) para el experimento. Todas las muestras fueron calentadas en un crisol de aluminio en una atmósfera de Nitrógeno desde 25°C hasta 700°C, con una tasa de calentamiento de 10°C/min [20].

Se determinó la tasa de biorentación global en las botellas utilizando la siguiente ecuación:

$$TBG = \left(\frac{DMB}{DMP} \right) \times \left(\frac{LDB}{LDP} \right)$$

Estirado radial: DMB= diámetro de la botella
DMP= diámetro de la preforma

Estirado axial (se resta la rosca y 5mm del cuello): LDB= longitud de la botella
LDP= longitud de la preforma

La botella obtenida de la preforma fabricada con PET reciclado se sometió a una prueba de resistencia a la compresión vertical, según lo establecido en la NTC 4773 utilizando un equipo de

ensayos industriales Instron® (UK) programado para una carga máxima de 240kg-f, un desplazamiento máximo de 8mm y una velocidad de la cruceta de 50mm/min.

Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos obtenidos se realizó mediante un diseño factorial 2^2 , con tres réplicas por análisis. Se utilizó Microsoft® Excel 2011 y IBM SPSS Statistics 2017. Con base en los resultados obtenidos se estableció la relación entre los niveles alto y bajo para cada uno de los factores temperatura y tiempo de residencia con las variables de respuesta viscosidad intrínseca y concentración de acetaldehído. Se planteó la hipótesis nula como la igualdad de los efectos de los tratamientos, temperatura y tiempo de residencia en el cristalizador, sobre las variables de respuesta y como hipótesis alterna, que al menos uno de los efectos de los tratamientos es diferente, para tomar la decisión se utilizó el estadístico F, con un valor teórico de 4,06 [21]. Por lo tanto si el estadístico F presentó valores inferiores al valor teórico la hipótesis nula no se rechaza. Se calcularon los supuestos de normalidad, homocedasticidad y aleatoriedad para validar el análisis. Finalmente, el análisis estadístico determinó las condiciones más favorables de operación del cristalizador basado en los resultados de viscosidad intrínseca más altos y la concentración de acetaldehído más baja.

Análisis de costo beneficio

El análisis de costo beneficio se calculó tomando los valores de los excedentes producidos y el PET reciclado consumido. Se determinó el porcentaje de PET reciclado consumido para los meses evaluados, teniendo en cuenta que el consumo actual es del 5% en la formulación de la preforma. Por lo tanto si este porcentaje aumenta el consumo de PET original disminuye y el costo también. Finalmente se presentaron los beneficios económicos del consumo de PET reciclado [22].

Los pasos utilizados para el análisis fueron: 1. Examinar las necesidades y considerar las limitaciones. 2. Establecer el punto de vista para analizar los costos y beneficios. 3. Reunir los datos para el análisis. 4. Determinar los costos exactos o estimados, y 5. Determinar los beneficios [23].

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Obtención de PET reciclado

El material PET reciclado tuvo un tamaño de pellet inferior a 4,75 mm (tamiz #4) después del proceso de peletizado. En la Figura 2a y 2b se puede observar fotografías del material obtenido en las dos etapas del reciclaje mecánico de excedentes industriales. El PET reciclado mecánicamente presentó diferencias en el tamaño del gránulo comparado con el PET virgen (Figura 2c), debido a los equipos utilizados, por este motivo el tamaño no fue un factor de evaluación en el reciclaje mecánico. A nivel visual se evidenció una diferencia en el color del PET reciclado que corresponde a la información reportada acerca de los cambios del material comparado con el PET virgen; y que aumentó con cada ciclo de reciclaje debido al rompimiento de los enlaces intramoleculares y las reacciones de oxidación [2] [3] [5].

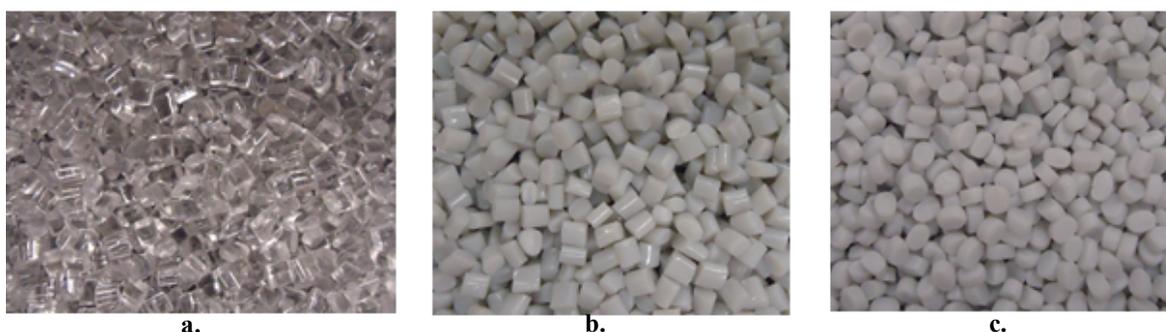


Figura 2. Proceso de reciclaje mecánico de PET, **a.** PET después del proceso de molido y peletizado. **b.** PET reciclado mecánicamente. **c.** PET virgen Polyclear®1101 de Indorama Ventures (México)

Caracterización del PET reciclado

Resina

En la Tabla 3 se presentan los resultados correspondientes para la viscosidad intrínseca (VI) y la concentración de acetaldehído (AA) a las temperaturas y tiempos de residencia en el Cristalizador. Los valores de viscosidad intrínseca fueron superiores principalmente para las muestras obtenidas a 165°C y 3 horas de residencia y 175°C y 4 horas de residencia en el Cristalizador; es decir para el mayor tiempo y temperatura, y el menor tiempo y temperatura. Los resultados obtenidos en parte son coherentes con lo reportado por Achilias et al. [1] quienes reportaron que a temperaturas cerca del punto de fusión del PET (285°C) la movilidad macromolecular es mayor y a bajas temperaturas hay una degradación continua de los grupos carboxilo finales. Y coincidió con lo reportado por Cruz et al. [24] que muestra una caída de la viscosidad intrínseca a altas temperaturas como función del tiempo, debido a la degradación termooxidativa y al contenido de humedad del ambiente, ya que en ambientes con N₂ la viscosidad aumentó.

Tabla 3. Resultados de la caracterización del PET reciclado según las condiciones de operación del Cristalizador

<i>Factores</i>		<i>VARIABLES DE RESPUESTA</i>	
Temperatura (°C)	Tiempo de residencia (h)	Viscosidad intrínseca-VI (dL/g)	Concentración de acetaldehído-AA (ppm)
165	3	0,675	0,607
175	4	0,655	0,588
175	3	0,618	0,768
165	4	0,637	0,681

De acuerdo con las reacciones de descomposición térmica e hidrólisis reportadas por Choi and Kim, [11], que influyen en: primero, los bajos valores del peso molecular del PET y su medida indirecta que es la viscosidad intrínseca; y segundo, las altas concentraciones de acetaldehído; se pudo afirmar que los resultados obtenidos a 165°C con 3 horas de residencia, y a 175°C con 4 horas de residencia son hasta ahora los más favorables para la obtención de PET reciclado mecánicamente proveniente de excedentes industriales del proceso de moldeo por inyección. Los valores obtenidos para la concentración de acetaldehído son favorables ya que pueden determinar que el uso del material PET reciclado mecánicamente en un producto final como una botella sea viable. Este subproducto es considerado un contaminante, y se ha reportado en la literatura que junto con el formaldehído migran de la botella a la bebida y pueden ser detectables sensorialmente [17].

Las Figuras 3 y 4 muestran las curvas de pérdida de masa y la derivada de la pérdida de masa obtenidas del análisis termogravimétrico (TGA) de las muestras de PET reciclado obtenido en el cristalizador a diferentes condiciones (165 y 175°C y 3 y 4 horas de residencia) y las muestras de PET original. El comportamiento de la degradación térmica fue similar en todas las muestras, por lo tanto, se pudo afirmar que se encuentran libres de contaminantes como otros materiales plásticos [20]. La degradación inició a valores superiores a 330°C que favorecen estas reacciones [20]. Esta degradación térmica inicia aleatoriamente por el enlace éster o la cadena, la reacción ocurre mediante la formación de un estado de transición de seis miembros, luego se rompe dejando grupos finales carboxilo y vinil éster [24] [25].

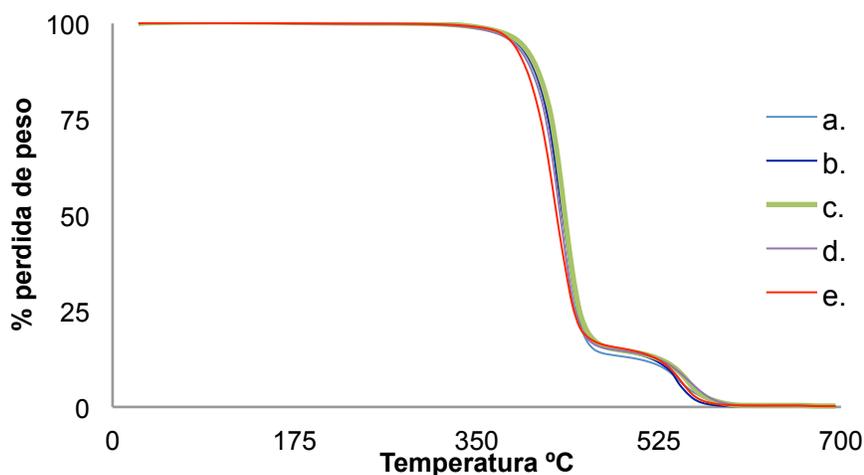


Figura 3. Curva de pérdida de masa análisis termogravimétrico de PET, **a.** PET reciclado a 165°C y 3 horas en el Cristalizador. **b.** PET reciclado a 165°C y 4 horas en el Cristalizador. **c.** PET reciclado a

175°C y 4 horas en el Cristalizador. **d.** PET reciclado a 175°C y 3 horas en el Cristalizador. **e.** PET original.

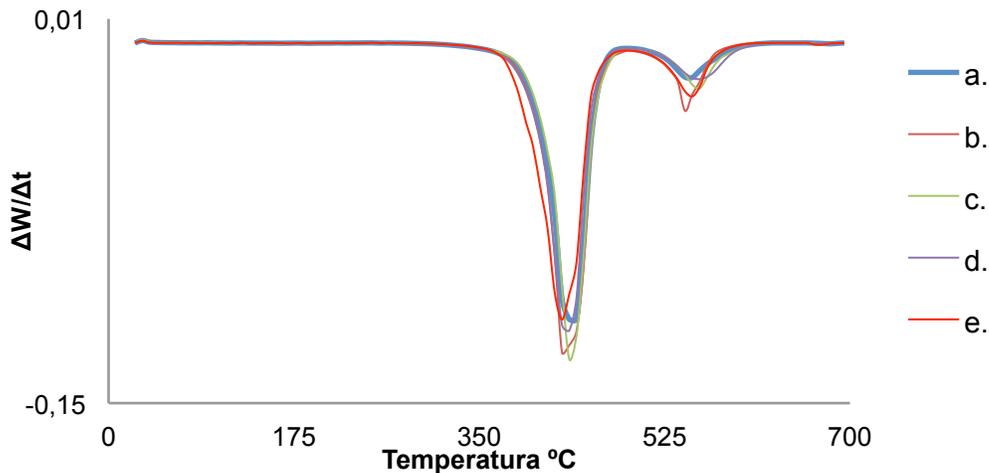


Figura 4. Curva de la derivada de pérdida de masa análisis termogravimétrico de PET, **a.** PET reciclado a 165°C y 3 horas en el Cristalizador. **b.** PET reciclado a 165°C y 4 horas en el Cristalizador. **c.** PET reciclado a 175°C y 4 horas en el Cristalizador. **d.** PET reciclado a 175°C y 3 horas en el Cristalizador. **e.** PET original.

El termograma del análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC) presentado en la Figura 5 muestra que el comportamiento térmico de las muestras de PET reciclado, obtenidas en el cristalizador y de marca comercial, junto con el PET original son similares [26]. Los cambios en la línea base se producen debido a un cambio en la capacidad calorífica o en la masa de la muestra [27]. La temperatura de descomposición para todas las muestras se encontró alrededor de los 680°C, corresponden a una entalpía endotérmica con un valor aproximado de $3,13E11$ J/g determinada por la evaluación del área del pico. La temperatura de fusión, aunque se destaca poco en la gráfica, corresponde a un pico endotérmico de $1,72E7$ J/g presente alrededor de los 250°C, valor que coincide con lo reportado en la literatura [26] [28] [29]. Los picos correspondientes a la cristalización para el PET que se reporta alrededor de los 150°C y temperatura de transición vítrea alrededor de los 65°C, no se presenta en estas muestras ya que son características de la porción amorfa de PET [29]. Los picos exotérmicos que se presentan entre 400 y 600°C corresponde a las reacciones de descomposición térmica del PET ya que posee picos anchos característicos, su entalpía es de aproximadamente $-1,15E7$ J/g [27].

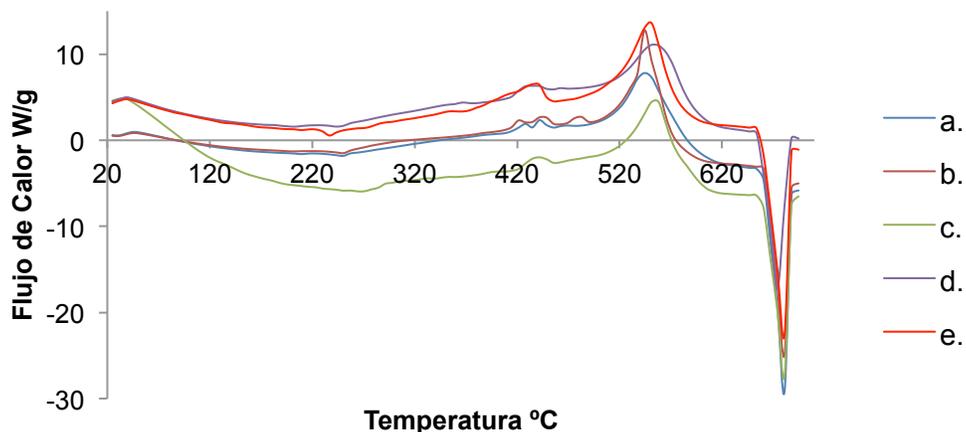


Figura 5. Curva de flujo de calor del análisis de Calorimetría Diferencial de Barrido de PET, **a.** PET reciclado a 165°C y 3 horas en el Cristalizador. **b.** PET reciclado a 165°C y 4 horas en el Cristalizador. **c.** PET reciclado a 175°C y 4 horas en el Cristalizador. **d.** PET reciclado a 175°C y 3 horas en el Cristalizador. **e.** PET original.

Preforma y botella

En la Tabla 4 se presentan los datos obtenidos para la viscosidad intrínseca (VI) y concentración de acetaldehído (AA) medidos en preforma fabricada con el PET reciclado obtenido en este estudio. Los resultados para viscosidad intrínseca más altos fueron los obtenidos en las condiciones 165°C y 3 horas y 175°C y 3 horas de residencia en el cristalizador. El porcentaje de PET reciclado utilizado en la fabricación de la preforma fue del 5%. Para obtener una alta viscosidad intrínseca que favorezca el desempeño de la preforma en el soplado influyen no solo la resina y PET reciclado, sino también el secado al que fue sometido el material antes de ser inyectado. Ya que con el secado se retira el agua que provoca las reacciones de hidrólisis. Las condiciones del secado fueron 5 horas a 170 +/- 10°C con un punto de rocío inferior a -40°C y flujo de aire de un pie cúbico por minuto.

Tabla 4. Resultados de la caracterización de la preforma fabricada con 5% de PET reciclado según las condiciones de operación del Cristalizador

Factores		Variables de respuesta	
Temperatura (°C)	Tiempo de residencia (h)	Viscosidad intrínseca- VI (dL/g)	Concentración de acetaldehído- AA (ppm)
165	3	0,838	4,573
175	4	0,779	2,670
175	3	0,845	4,167
165	4	0,778	2,873

La preforma fabricada con 5% de PET reciclado corresponde a un peso de 40g y se utilizó para la producción de botella de 1,5L. La tasa de biorentación para esta botella fue de 11,9.

$$TBG = (\text{Estirado radial}) \times (\text{Estirado axial})$$

$$TBG = (4,4) \times (2,7) = 11,9$$

Estas botellas se sometieron a una prueba de resistencia a la compresión según la norma ASTM D695 [30] y NTC 4773 [31]; los resultados se representan en la Figura 6. Para todas las pruebas los resultados fueron similares, entre 20 y 25 kg-F. Para el tamaño de botella evaluado el valor común de resistencia a la compresión debe ser superior a 17 kg-F según la especificación interna para Iberplast y superior a 4,5 kg-F según la NTC 4773.

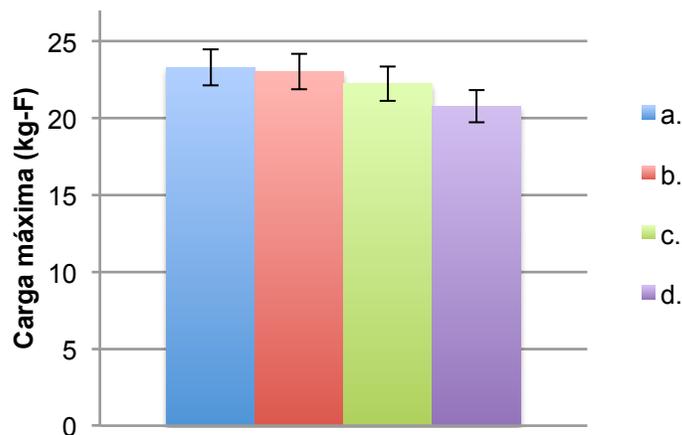


Figura 6. Resistencia a la compresión de la botella fabricada con 5% de PET reciclado **a.** PET reciclado a 165°C y 3 horas en el Cristalizador. **b.** PET reciclado a 165°C y 4 horas en el Cristalizador. **c.** PET reciclado a 175°C y 4 horas en el Cristalizador. **d.** PET reciclado a 175°C y 3 horas en el Cristalizador.

Análisis estadístico

Estadísticamente se dedujo que los factores temperatura (°C) y tiempo de residencia (h) tienen efecto en las variables de respuesta, viscosidad intrínseca VI (dL/g) y concentración de acetaldehído AA (ppm) como se muestra en la Tabla 5 [21]; ya que existió una similitud entre las medias de los cuadrados y un valor positivo para el estadístico F que indica un efecto significativo de los factores en las variables de respuesta. Como el valor calculado del estadístico F es menor a 4,06 se acepta la hipótesis nula acerca de la igualdad de los efectos de la temperatura y tiempo de residencia en el cristalizador sobre las variables de respuesta. El valor negativo para la interacción entre los factores y sus niveles indica un efecto poco significativo. Sin embargo, existió una interacción para la variable de respuesta viscosidad intrínseca. Los resultados se presentan en la Figura 7 en la cual se muestra los factores del tiempo de residencia se cortan entre sí. En la figura 8 se observa la no interacción para la variable de respuesta concentración de acetaldehído.

Tabla 5. Tabla de análisis de varianza de los resultados de la caracterización del PET reciclado.

ANOVA		VI			AA		
Causas de variación	Grados de libertad	Sumas de cuadrados	Cuadrado medio	F	Sumas de cuadrados	Cuadrado medio	F
Temperatura	1	0,034	0,034	3,918	0,036	0,036	3,919
Tiempo de residencia	1	0,034	0,034	3,917	0,036	0,036	3,923
Interacción	1	-0,026	-0,026	-3,001	-0,027	-0,027	-3,009
Error	44	0,383	0,009		0,401	0,009	
Total	47	0,425			0,445		

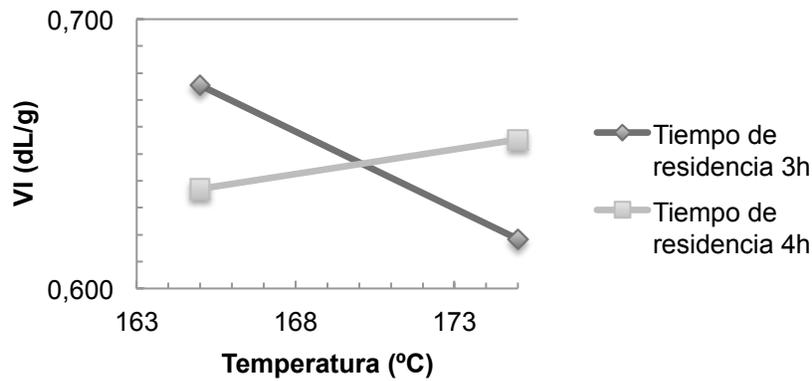


Figura 7. Representación del experimento factorial con interacción de los niveles del tiempo de residencia para la variable de respuesta viscosidad intrínseca VI en muestra de resina.

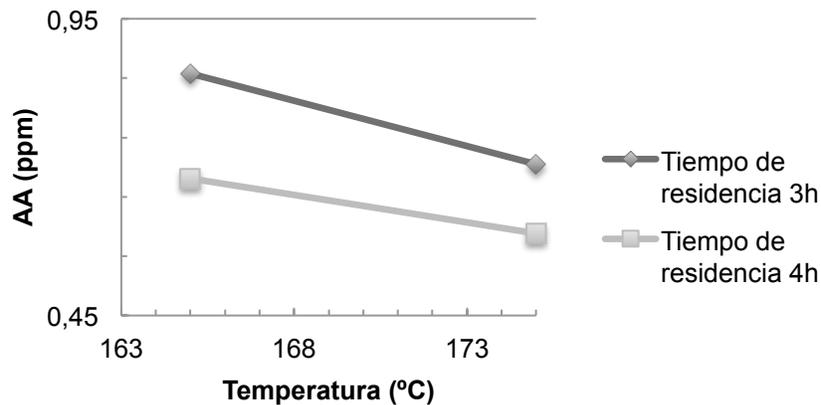


Figura 8. Representación del experimento factorial sin interacción de los niveles del tiempo de residencia para la variable de respuesta concentración de acetaldehído AA en muestra de resina.

Los resultados de los supuestos de normalidad, homocedasticidad y aleatoriedad de las muestras de resina indican que con un nivel de significancia de 0,05 los datos se comportan bajo una distribución normal con valores calculados de 0,20 para viscosidad intrínseca y concentración de acetaldehído; también que todas las varianzas son homogéneas con valores calculados de 0,057 para los datos de viscosidad intrínseca y 0,099 para los datos de concentración de acetaldehído; y que las muestras fueron tomadas aleatoriamente con valores calculados de 0,762 para viscosidad intrínseca y 0,130 para concentración de acetaldehído.

En la medición para la preforma fabricada con 5% de PET reciclado estadísticamente se dedujo que los factores temperatura (°C) y tiempo de residencia (h) tienen efecto en las variables de respuesta, viscosidad intrínseca VI (dL/g) y concentración de acetaldehído AA (ppm) como se muestra en la Tabla 6 [21]; ya que existió una similitud entre las medias de los cuadrados y un valor alto para el estadístico F que indica un efecto significativo de los factores en las variables de respuesta. El valor calculado del estadístico F es menor a 4,06 para uno de los tratamientos y para el otro es mayor por lo tanto se rechaza la hipótesis nula acerca de la igualdad de los efectos de los tratamientos sobre las variables de respuesta, pero se acepta la hipótesis alterna. El valor negativo para la interacción entre los factores y sus niveles indica un efecto poco significativo. En las Figuras 9 y 10 se observa la no interacción.

Tabla 6. Tabla de análisis de varianza de los resultados de la caracterización del PET reciclado utilizado en la fabricación de preforma.

ANOVA		VI			AA		
Causas de variación	Grados de libertad	Sumas de cuadrados	Cuadrado medio	F	Sumas de cuadrados	Cuadrado medio	F
Temperatura	1	0,054	0,054	3,917	1,042	1,042	3,924
Tiempo de residencia	1	0,054	0,054	3,923	1,094	1,094	4,117
Interacción	1	-0,041	-0,041	-3,006	-0,852	-0,852	-3,208
Error	44	0,602	0,014		11,688	0,266	
Total	47	0,668			12,972		

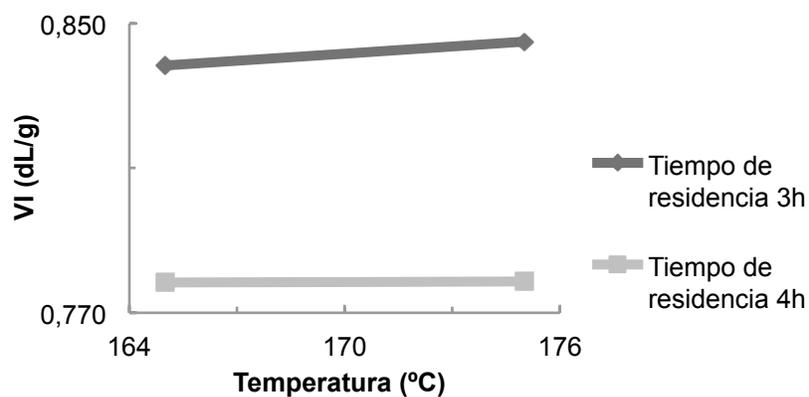


Figura 9. Representación del experimento factorial sin interacción de los niveles del tiempo de residencia para la variable de respuesta viscosidad intrínseca VI en muestras de preforma.

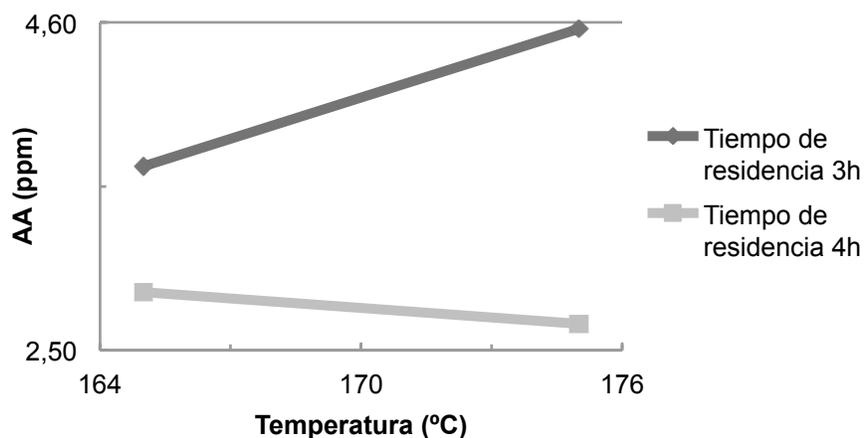


Figura 10. Representación del experimento factorial sin interacción de los niveles del tiempo de residencia para la variable de respuesta concentración de acetaldehído AA en muestra de preforma.

Los resultados de los supuestos de normalidad, homocedasticidad y aleatoriedad de las muestras de resina indican que con un nivel de significancia de 0,05 los datos se comportan bajo una distribución

normal con valores calculados de 0,20 para viscosidad intrínseca y concentración de acetaldehído; también que todas las varianzas son homogéneas con valores calculados de 0,090 para los datos de viscosidad intrínseca y 0,272 para los datos de concentración de acetaldehído; y que las muestras fueron tomadas aleatoriamente con valores calculados de 0,130 para viscosidad intrínseca y concentración de acetaldehído.

Análisis de costo beneficio

El fin del análisis costo beneficio no es aumentar la producción sino la utilidad [32]. La empresa facilitó los balances de producción de excedentes industriales de las plantas de todo el país y el consumo de PET reciclado en la fabricación de preforma para los meses de mayo a octubre de 2017, de allí se obtienen los datos presentados en la Tabla 7; los valores del consumo de PET reciclado son superiores en más del doble de los excedentes producidos. Por lo tanto se puede afirmar que si se han acumulado excedentes industriales de meses anteriores y para el período evaluado se ha visto un consumo de este material.

Tabla 7. Excedentes industriales producidos y consumidos en los meses de mayo a octubre de 2017.

Mes (2017)	Total excedentes producidos (kg)	Consumo de PET reciclado (kg)
Mayo	235.535,60	655.033,80
Junio	290.590,40	551.058,50
Julio	227.472,00	624.574,60
Agosto	404.345,38	1.070.076,50
Septiembre	540.256,16	729.940,00
Octubre	341.582,89	778.939,30
Promedio	339.963,74	734.937,12

Los consumos de PET reciclado presentados en la tabla anterior corresponden al uso en un 5% en la formulación de la fabricación de preforma.

En la actualidad la compra de PET para uso en botellas no retornables se encuentra alrededor de 2500 Ton por mes con un costo de \$5.100.000 USD. El ahorro en compra de materia prima y costo usando en 5% en la formulación, sería del 5%; tomando como base el uso de PET original al 100%. En la tabla 8 se encuentran los porcentajes de ahorro mensual en la compra de PET original si se usa un 5% de PET reciclado, se presenta una disminución en las toneladas compradas por mes y su costo.

Tabla 8. Ahorro en compra de materia prima con uso de PET reciclado en un 5% en formulación. Cálculo con uso actual de 100% de PET original

PET original Formulación	Toneladas compradas por mes	Precio USD	% ahorro mensual
100%	2500	5.100.000,00	0%
95%	2375	4.845.000,00	5%
Diferencia		255.000,00	

El uso de PET reciclado es un beneficio económico y ambiental para la empresa, ayuda a minimizar la compra de materia prima, reutilizando los excedentes del mismo proceso productivo. Los excedentes industriales a nivel ambiental pueden considerarse residuos y el consumo en su totalidad, como se observó en el período presentado, indica una reducción en la generación y posterior disposición de estos residuos, siendo este el beneficio ambiental.

El análisis del consumo energético y su costo para las condiciones actuales del cristalizador, que son temperatura de 165°C y 3 horas de residencia para el reciclaje mecánico de PET, se presentan en la Tabla 9. Corresponde a los valores promedio del consumo energético en kWh del cristalizador en el período de septiembre a diciembre de 2017 y su correspondiente costo. Se tomó \$452,43 por mes, como el costo del kWh según la facturación de la empresa de energía del municipio. Los consumos presentan diferencias de acuerdo al uso del cristalizador durante cada mes, el promedio para el período evaluado fue de 683,75kWh con un costo de \$309.349.

Tabla 9. Consumo y costo energético del uso del cristalizador durante los meses de septiembre a diciembre de 2017

Condiciones: 165°C 3 horas de residencia		
Mes	Consumo kWh	Costo energía
Septiembre	793	\$358.777
Octubre	668	\$302.223
Noviembre	656	\$296.794
Diciembre	618	\$279.602
Promedio	683,75	\$309.349

En base a los datos obtenidos de la tabla 9 se determinó cuanto aumentaría el consumo y costo energético para las otras condiciones evaluadas en el cristalizador, esta información se presenta en la Tabla 10. El aumento en el costo energético sería entre el 6 al 29%, es decir entre \$18.000 y \$129.000 mensuales comparado con el valor promedio obtenido a las condiciones actuales de operación a 165°C y 3 horas de residencia.

Tabla 10. Costo del uso del cristalizador con otras condiciones de operación

Condición	Consumo kWh	Costo energía	Aumento
165°C- 4 h	911,67	\$412.467	25%
175°C- 3 h	725,19	\$328.098	6%
175°C- 4 h	966,92	\$437.464	29%

El proceso de reciclaje de PET utilizando las condiciones de 165°C de temperatura y 3 horas de tiempo de residencia es eficiente en términos de un análisis costo beneficio para un proyecto, ya que no requiere de recursos extras o empeora otro proceso para mejorar este [32]; las condiciones favorables mencionadas fueron los niveles bajos del análisis factorial. Las condiciones de 165°C de temperatura y 3 horas de tiempo de residencia tienen beneficios ambientales relacionados con el ahorro y menor consumo de energía.

Ambientalmente la reducción en la generación de residuos y el ahorro o menor consumo de energía en el proceso de reciclaje mecánico de PET beneficia a la empresa y al ambiente ya que hace parte de los lineamiento de la gestión ambiental.

Según los resultados obtenidos se puede plantear el aumento del porcentaje de PET reciclado en la formulación, sin embargo requiere de investigaciones posteriores para determinar cual sería el porcentaje de PET reciclado favorable para la fabricación de botellas . El uso de preformas con este porcentaje de PET reciclado sería para botellas de capacidad inferior a 1L o hasta 1,5L como la utilizada en el experimento; con una tasa de biorientación entre 10 y 14 [33]; la tasa de biorientación se refiere al estiramiento radial y axial de la preforma para obtener una botella y de esta dependen propiedades como barrera, estabilidad mecánica y aspecto [34]. Y en cumplimiento con lo establecido en la NTC 4773 que determina los valores para el contenido de acetaldehído y la resistencia a la compresión en una botella para uso en bebidas gaseosas [31]. El aumento de consumo de PET reciclado también generaría una disminución en la compra de materia prima y el costo.

CONCLUSIONES

Los resultados del estudio permitieron identificar a 165°C y 3 horas de residencia en el cristalizador como una de las condiciones favorables de operación para el reciclaje de excedentes industriales de PET. Los valores altos para la viscosidad intrínseca y bajos para la concentración de acetaldehído son favorables para la utilización de este material de nuevo en el proceso productivo. Las condiciones favorables coincidieron con las usadas en la actualidad.

El análisis estadístico demostró que los factores temperatura y tiempo de residencia en el cristalizador para la obtención de PET reciclado influyen en las variables de respuesta: viscosidad intrínseca y concentración de acetaldehído, que se encuentran asociadas a las reacciones de descomposición térmica e hidrólisis. Los análisis térmicos permitieron identificar comportamientos del PET reciclado mecánicamente, compararlos con PET original y que se encuentra libre de contaminantes.

El PET reciclado mecánicamente reintegrado al proceso productivo no generó cambios en la calidad de los productos como en la tasa de biorentación o en la prueba de resistencia a la compresión de la botella. Sin embargo sí influyó significativamente en la viscosidad intrínseca y concentración de acetaldehído de la preforma.

El principal beneficio del estudio es el conocimiento de las condiciones favorables de operación del cristalizador que se desconocían hasta ahora, a nivel de calidad se determinó la influencia del PET reciclado en la fabricación de nuevos productos y también se logró caracterizar. A nivel productivo y ambiental, a pesar de que las condiciones favorables son las mismas actuales, se evaluaron los beneficios económicos del consumo de PET reciclado que genera beneficios para Iberplast en el almacenamiento de este y la disminución en los costos de compra de PET original de un 5% que significa aproximadamente \$255.000 USD.

AGRADECIMIENTOS

A la Compañía Iberoamericana de Plásticos Iberplast y al grupo Energía, Materiales y Ambiente (GEMA) de la Universidad de La Sabana.

BIBLIOGRAFÍA

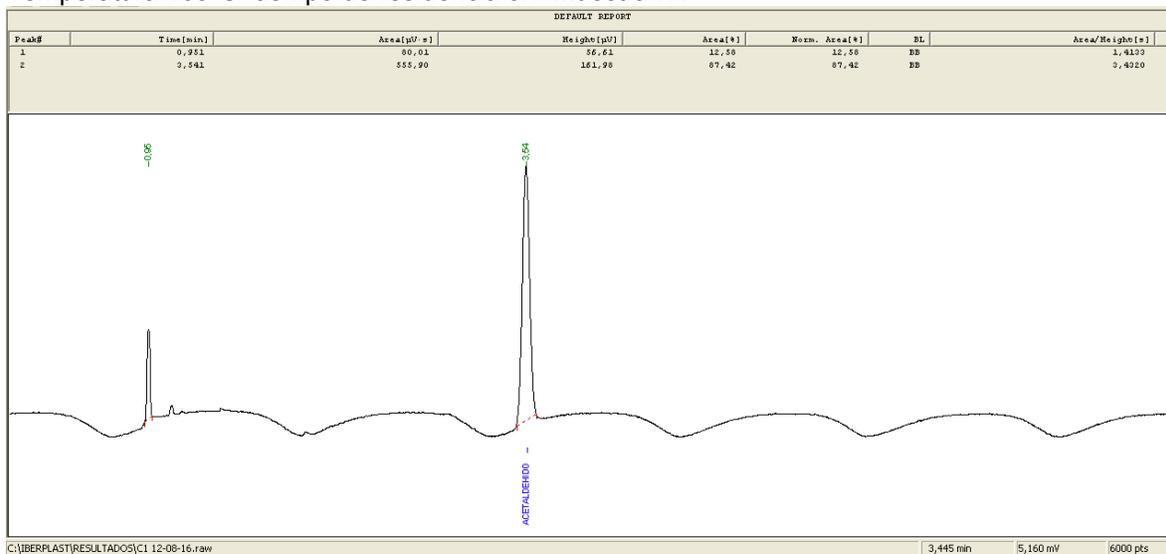
- [1]. Achilias, D., Karandrea, E., Triantafyllidis, K., Ladavos, A. and Bikiaris, D. Effect of organoclays type on solid-state polymerization (SSP) of poly (ethylene terephthalate): Experimental and modeling. *European Polymer Journal*. 2015; 63:156-167.
- [2]. Welle, F. Twenty years of PET bottle to bottle recycling - An overview. *Resources, Conservation and Recycling*. 2011; 55(11): 865–875.
- [3]. Kostov, G., Atanassov, A., & Kiryakova, D. Rheological Behaviour of Recycled and Virgin Polyethylene terephthalate and Mixtures of Them. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*. 2013; 29(4): 255–271.
- [4]. López, M., Ares Pernas, A., Abad López, M., Latorre, A., López Vilariño, J. and González Rodríguez, M. Assessing changes on poly (ethylene terephthalate) properties after recycling: Mechanical recycling in laboratory versus postconsumer recycled material. *Materials Chemistry and Physics*. 2014; 147(3): 884-894.
- [5]. Al-Sabagh, A., Yehia, F., Eshaq, G., Rabie, A. and ElMetwally, A. Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2015; 25(1): 53-64
- [6]. Takatori, E. Material recycling of polymer materials & material properties of the recycled materials. *Nippon Gomu Kyokaishi*. 2015; 11(11): 441–446.
- [7]. Pendin F, Ziliotto T, inventores. Euronewpack S R L, solicitante. Method for making a product by recycling polyethylene foam, system for making said product and product obtained therewith. WO2016016806. 2016
- [8]. Guven Ali Hakan, inventor y solicitante. A method for recycling waste thermoplastic materials and using this recycled thermoplastic in composite material production. WO2013070176. 2013
- [9]. Arias, F. Enka ya vende la mitad de la producción al exterior. *El Colombiano* [Internet]. 2015 [citado 30 de septiembre de 2015]; [aprox. 1p]. Disponible en: <http://www.elcolombiano.com/enka-ya-vende-la-mitad-de-la-produccion-al-exterior-CD1489576>
- [10]. FDA U S Food and Drug Administration. Recycled plastics in food packaging. *Fda.gov* [Internet]. 2014 [Citado 4 de septiembre de 2017]; [aprox. 1p]. Disponible en: <https://www.fda.gov/Food/IngredientsPackagingLabeling/PackagingFCS/RecycledPlastics/ucm093435.htm>
- [11]. Choi, Y. and Kim, S. Characterization of recycled polyethylene terephthalates and polyethylene terephthalate-nylon6 blend knitted fabrics. *Textile Research Journal*. 2014; 85(4): 337-345.
- [12]. Hamad, K., Kaseem, M. and Deri, F. Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works. *Polymer Degradation and Stability*. 2013; 98(12): 2801-2812.
- [13]. Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*. 2017; 69: 24-58.
- [14]. Maris J, Bourdon S, Brossard J-M, Cauret L, Fontaine L, Montembault Vé, Mechanical recycling: Compatibilization of mixed thermoplastic wastes. *Polymer Degradation and Stability* 2018; 147: 245-266.
- [15]. Mohammed A. Flexural behavior and analysis of reinforced concrete beams made of recycled PET waste concrete. *Construction and Building Materials*. 2017; 155: 593-604.
- [16]. Sanches, N., Dias, M. and Pacheco, E. Comparative techniques for molecular weight evaluation of poly (ethylene terephthalate) (PET). *Polymer Testing*. 2005; 24(6): 688-693.
- [17]. Bach, C., Dauchy, X., Chagnon, M. and Etienne, S. Chemical compounds and toxicological assessments of drinking water stored in polyethylene terephthalate (PET) bottles: A source of controversy reviewed. *Water Research*. 2012; 46(3): 571-583.
- [18]. Norma ASTM F2013-10, Standard Test Method for Determination of Residual Acetaldehyde in Polyethylene Terephthalate Bottle Polymer Using an Automated Static Head-Space Sampling Device and a Capillary GC with a Flame Ionization Detector, Vol. 15.10, West Conshohocken (EE. UU.): American Society For Testing and Materials, 2016.
- [19]. Kolb, B. and Ettre, L. *Static Headspace-Gas Chromatography: Theory and Practice*, 2da Ed. New Jersey. (EE. UU.): Wiley, 2006, Chapter 9.

- [20]. Ko, K. H., Rawal, A., & Sahajwalla, V. Analysis of thermal degradation kinetics and carbon structure changes of co-pyrolysis between macadamia nut shell and PET using thermo gravimetric analysis and ¹³C solid state nuclear magnetic resonance. *Energy Conversion and Management*. 2014; 86: 154–164.
- [21]. Montgomery, D. *Diseño y análisis de experimentos*, 2da Ed. México D.F. (México): Editorial Limusa, 2004, Cap. 5 y 6
- [22]. Sapag N. Sapag R. *Antecedentes económicos del estudio técnico*. En: Sapag N. Sapag R. *Preparación y evaluación de proyectos*. 5ta Ed. Bogotá (Colombia): Editorial McGraw-Hill, 2008, Cap. 7.
- [23]. Tcass.com [Internet]. Colombia: TCA Software Solutions; 2017[Citado 12 de noviembre de 2017]. Disponible en: http://www.tcass.com/pdf/Como_analizar_un_buen_analisis_Costo_Beneficio_Riesgo.pdf
- [24]. Cruz, S. A., Scuracchio, C. H., Fitaroni, L. B., & Oliveira, C. The use of melt rheology and solution viscometry for degradation study of post-consumer poly (ethylene terephthalate): The effects of the contaminants, reprocessing and solid state polymerization. *Polymer Testing*. 2017; 60: 236–241.
- [25]. Meng, A., Chen, S., Long, Y., Zhou, H., Zhang, Y., & Li, Q. Pyrolysis and gasification of typical components in wastes with macro-TGA. *Waste Management*. 2015; 46: 247–256.
- [26]. Cinar, M. E., & Kar, F. Characterization of composite produced from waste PET and marble dust. *Construction and Building Materials*. 2018; 163: 734–741.
- [27]. *Métodos de análisis térmico diferencial* [Internet]. Argentina: Santafé- Conicet [citado 27 Feb 2018]. Disponible en: <http://www.gp.santafe-conicet.gov.ar/cursos/a/a.07.pdf>
- [28]. Majewsky, M., Bitter, H., Eiche, E., & Horn, H. Determination of microplastic polyethylene (PE) and polypropylene (PP) in environmental samples using thermal analysis (TGA-DSC). *Science of the Total Environment*. 2016; 568: 507–511.
- [29]. Schawe, J. E. K. Remarks regarding the determination of the initial crystallinity by temperature modulated DSC. *Thermochimica Acta*. 2017; 657: 151–155.
- [30]. Norma ASTM D695-15, Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics, Vol. 08.01, West Conshohocken (EE. UU.): American Society For Testing and Materials, 2015.
- [31]. Norma NTC 4773, Botellas plásticas PET no retornables para bebidas gaseosas, Vol. 1, Bogotá (Colombia): Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2000.
- [32]. Rus De, G. *Análisis Coste-Beneficio*, 3ra Ed. Barcelona (España): Editorial Ariel S.A., 2008, Cap. 2
- [33]. Lobera F, inventor. Schmalbach Lubeca PET Containers IBERIA S. A. solicitante. Procedimiento de optimización de preformas y preformas aligeradas así obtenidas. WO1998025752. 1998
- [34]. Leza F, González D, inventores. Brilen S. A. solicitante. Resina de poli tereftalato de etileno para la producción de envases. ES2217909. 2004

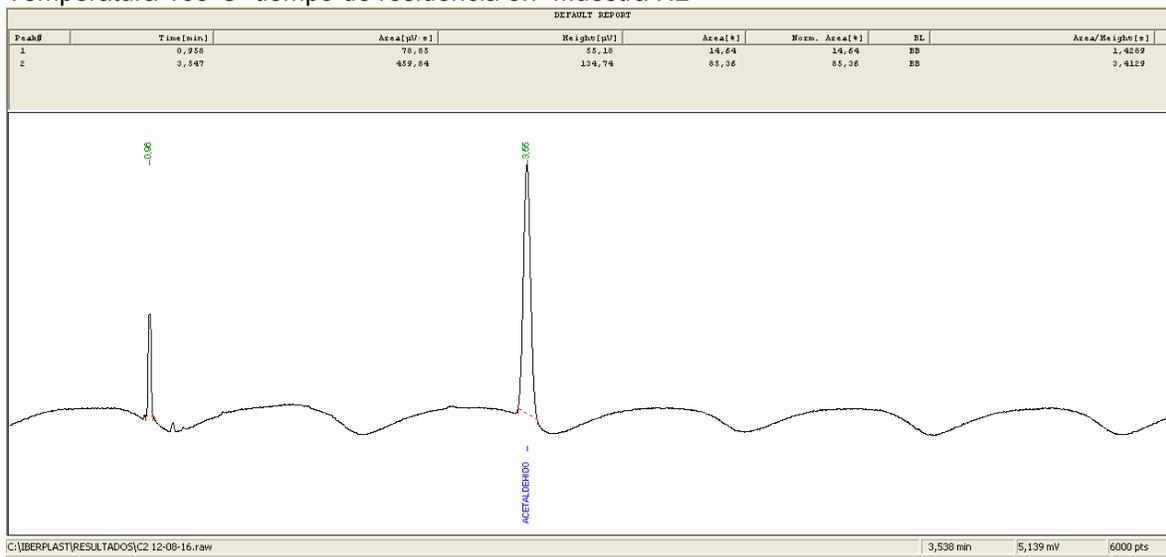
ANEXOS

Cromatogramas: medición de concentración de acetaldehído en muestras de resina PET

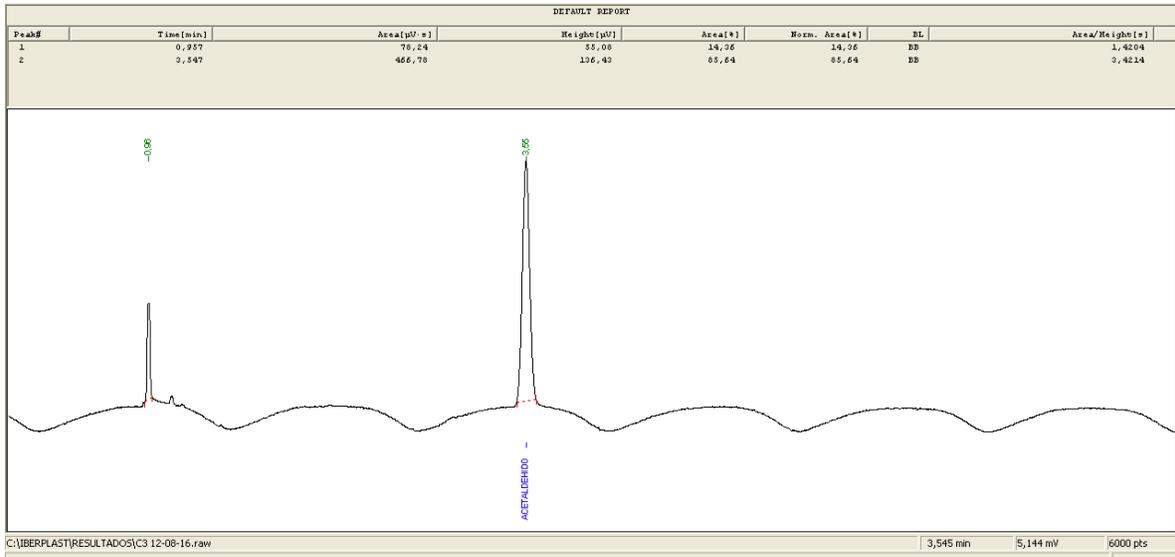
Temperatura 165°C- tiempo de residencia 3h- Muestra N1



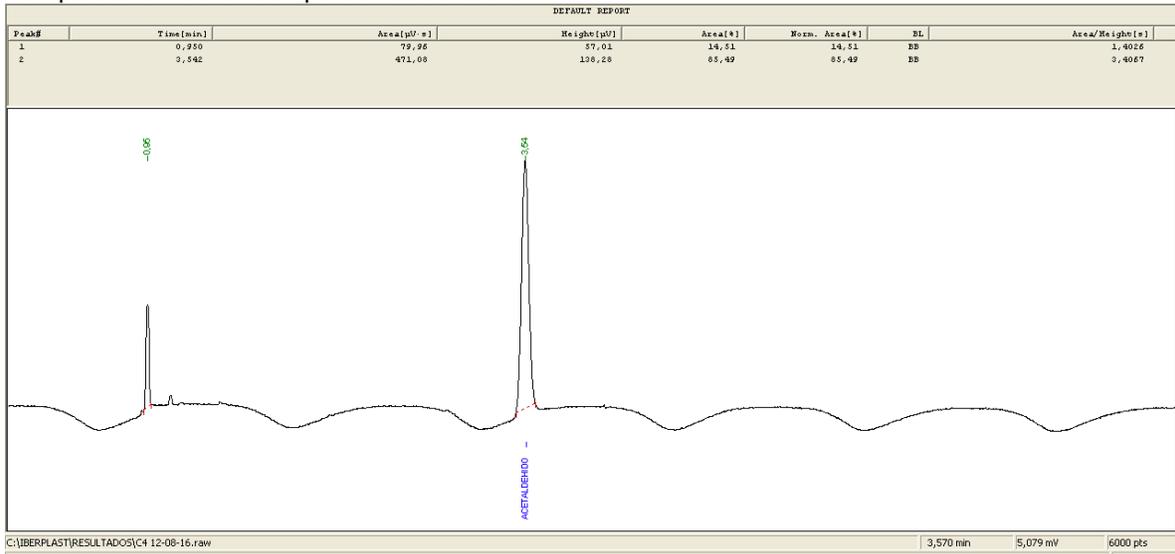
Temperatura 165°C- tiempo de residencia 3h- Muestra N2



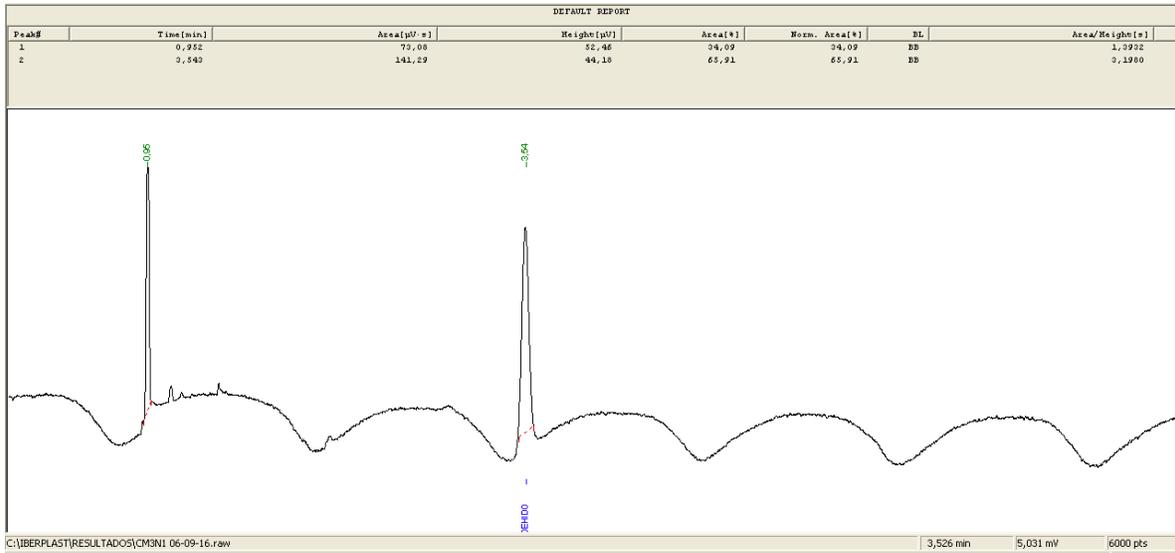
Temperatura 165°C- tiempo de residencia 3h- Muestra N3



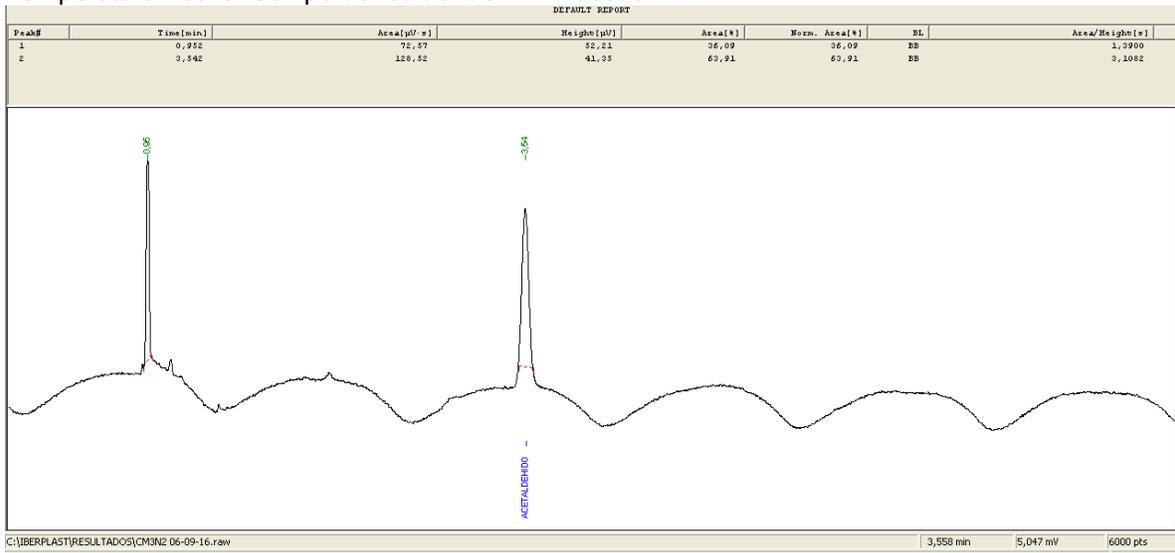
Temperatura 165°C- tiempo de residencia 3h- Muestra N4



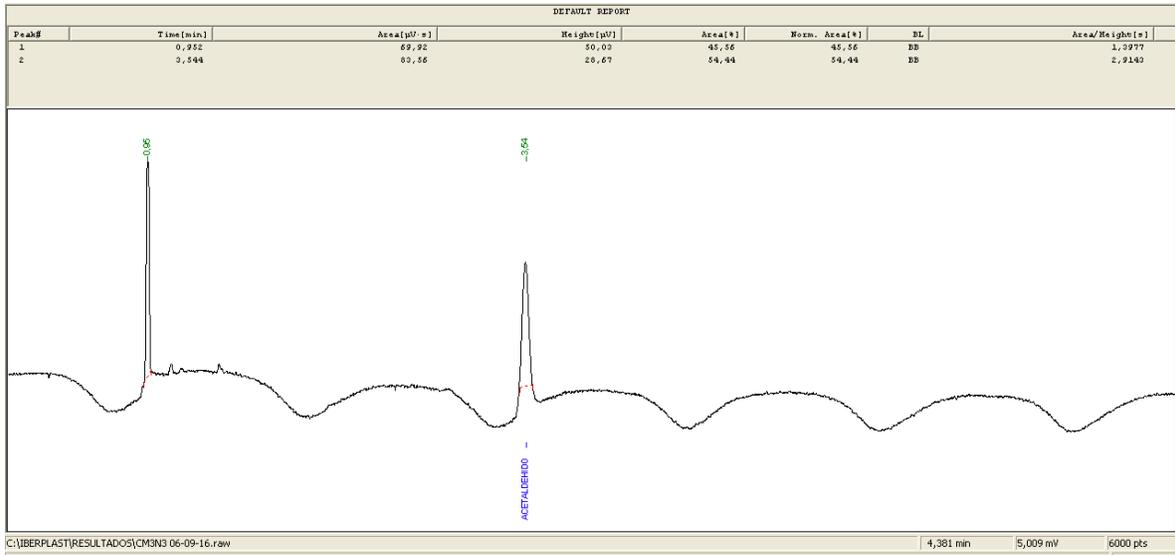
Temperatura 165°C- tiempo de residencia 4h- Muestra N1



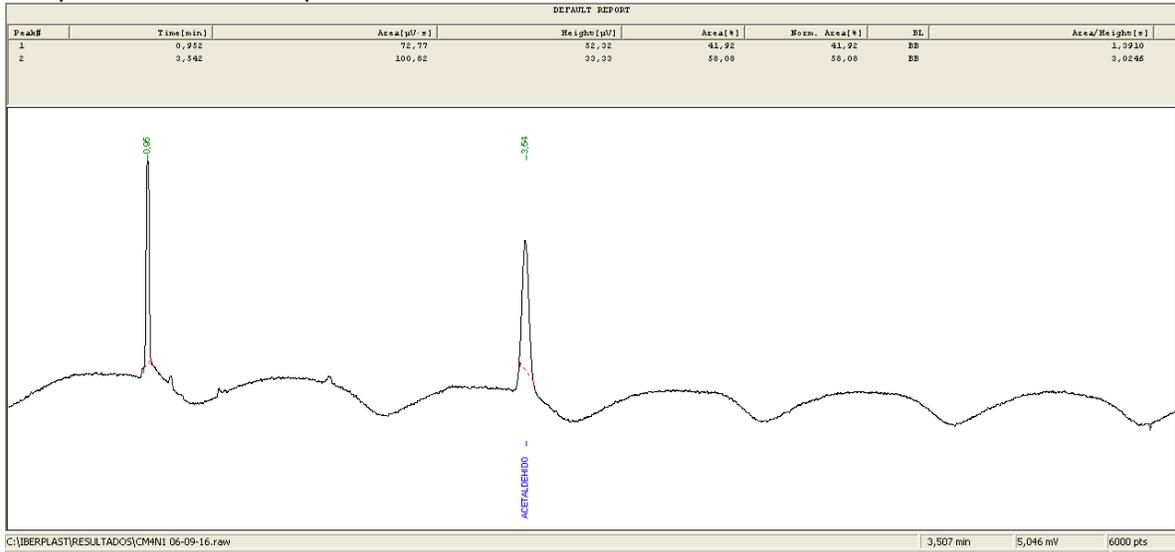
Temperatura 165°C- tiempo de residencia 4h- Muestra N2



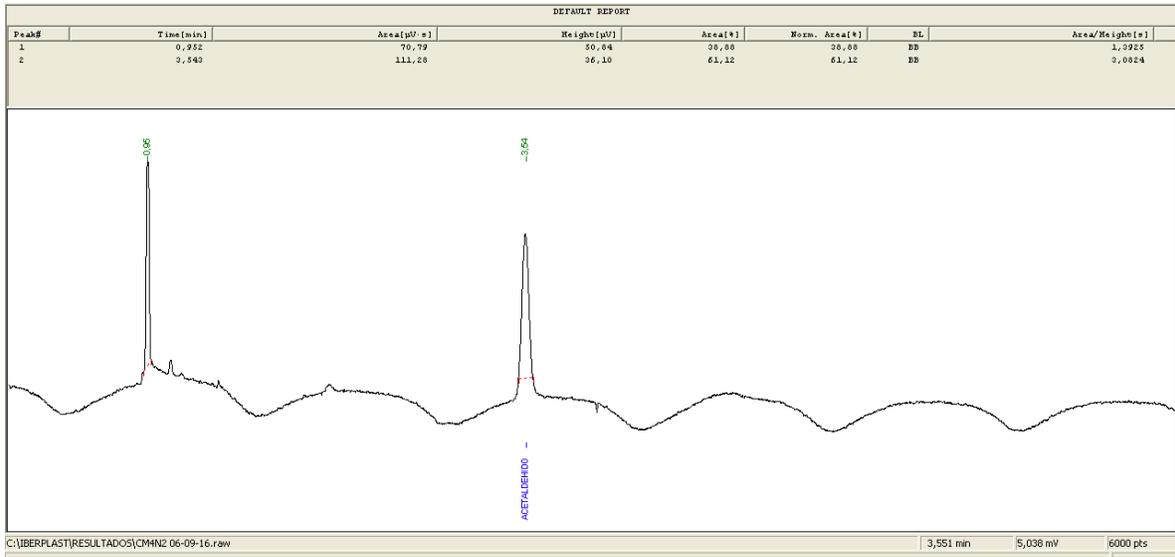
Temperatura 165°C- tiempo de residencia 4h- Muestra N3



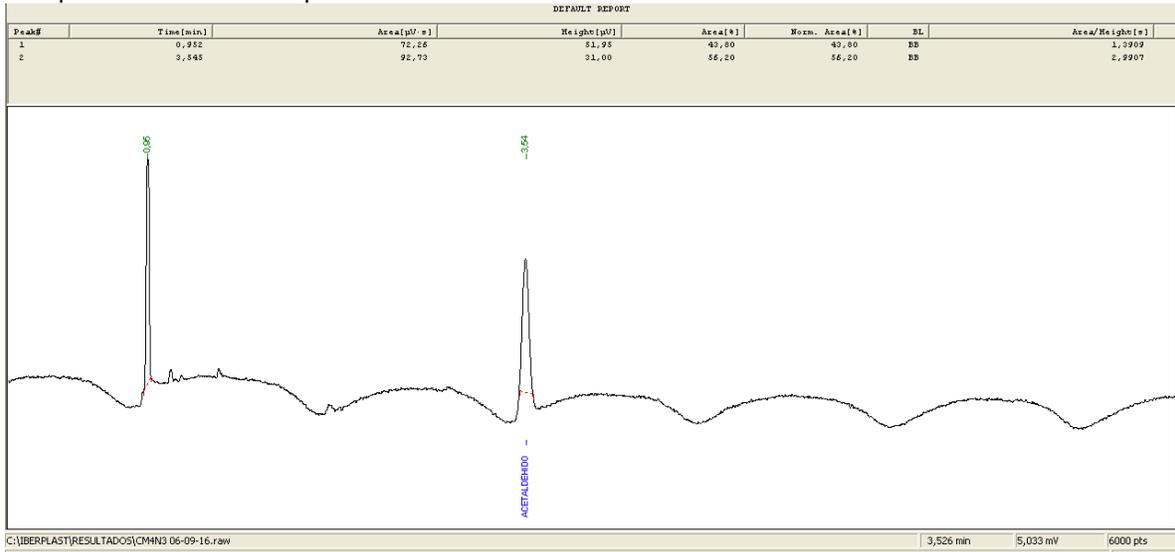
Temperatura 175°C- tiempo de residencia 3h- Muestra N1



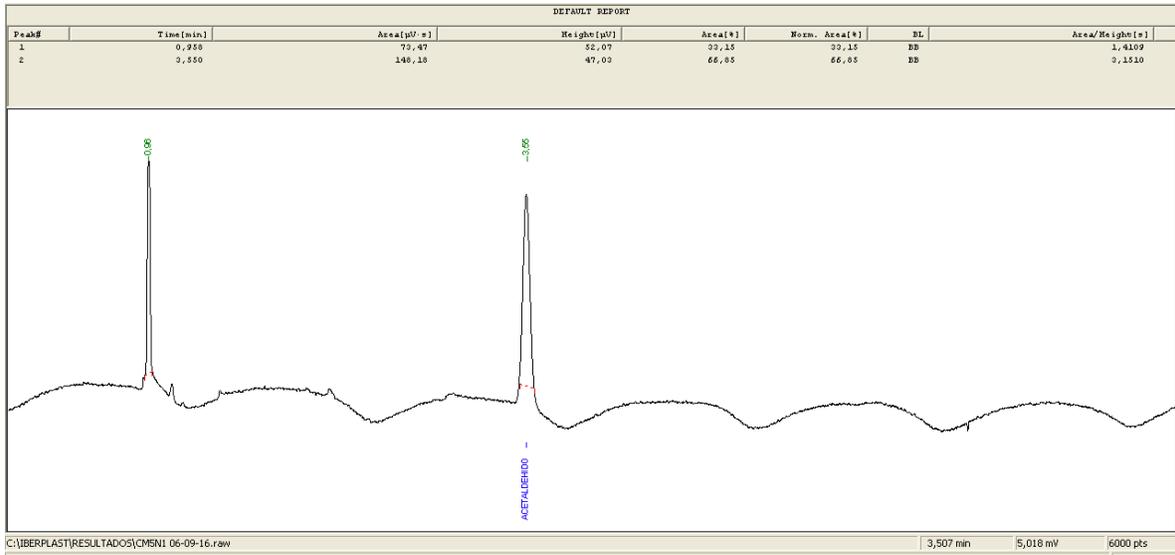
Temperatura 175°C- tiempo de residencia 3h- Muestra N2



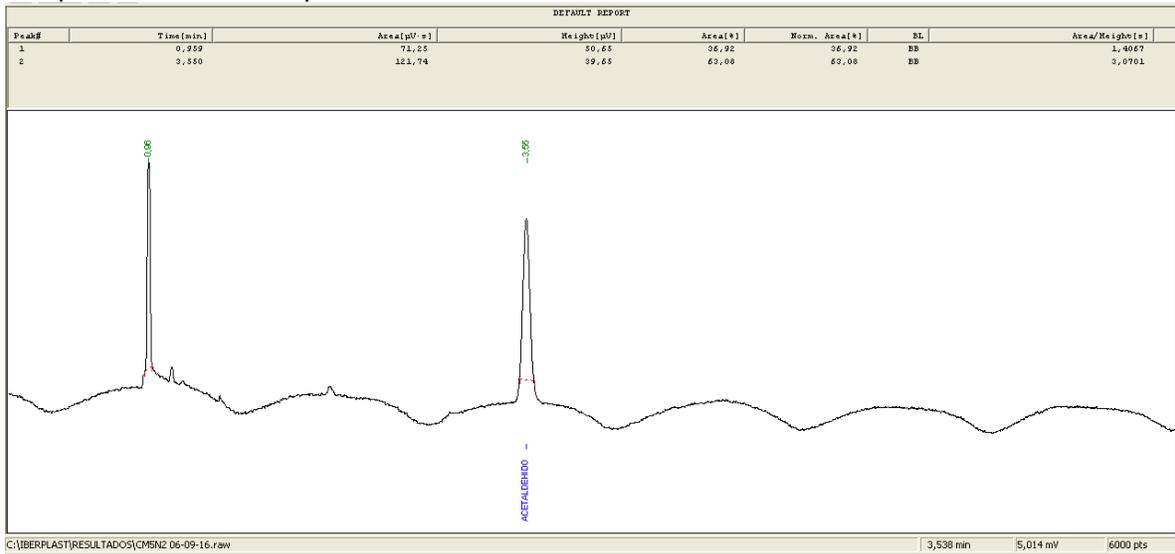
Temperatura 175°C- tiempo de residencia 3h- Muestra N3



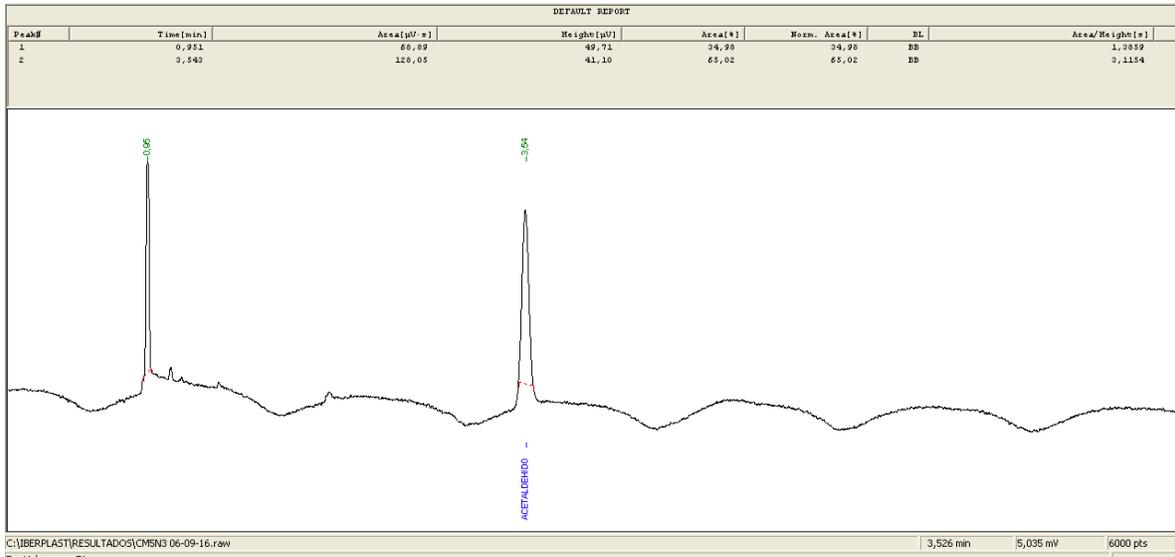
Temperatura 175°C- tiempo de residencia 4h- Muestra N1



Temperatura 175°C- tiempo de residencia 4h- Muestra N2

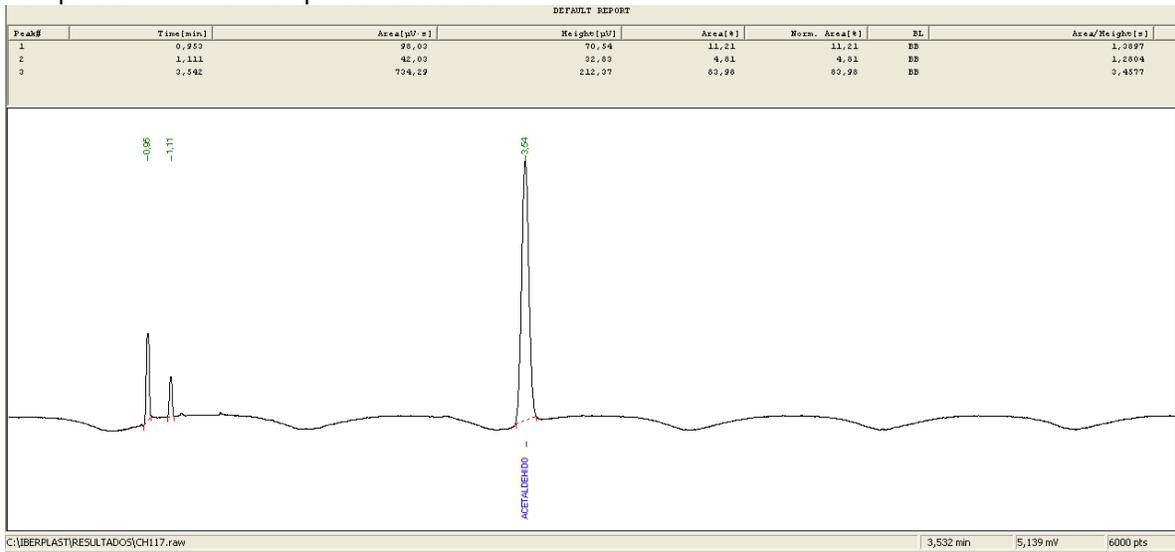


Temperatura 175°C- tiempo de residencia 4h- Muestra N3

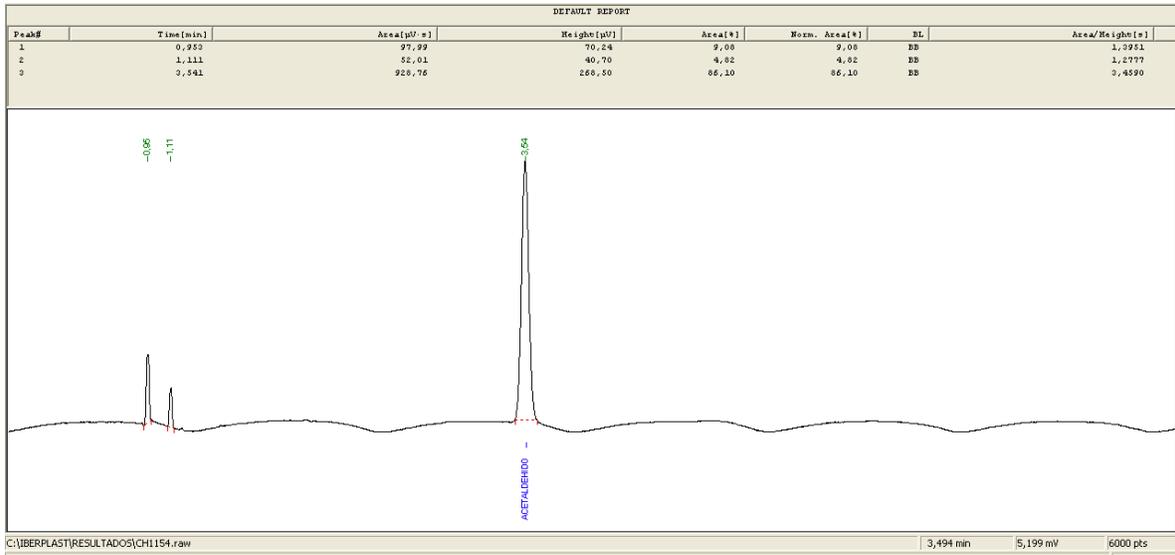


Cromatogramas: medición de concentración de acetaldehído en muestras de preforma PET

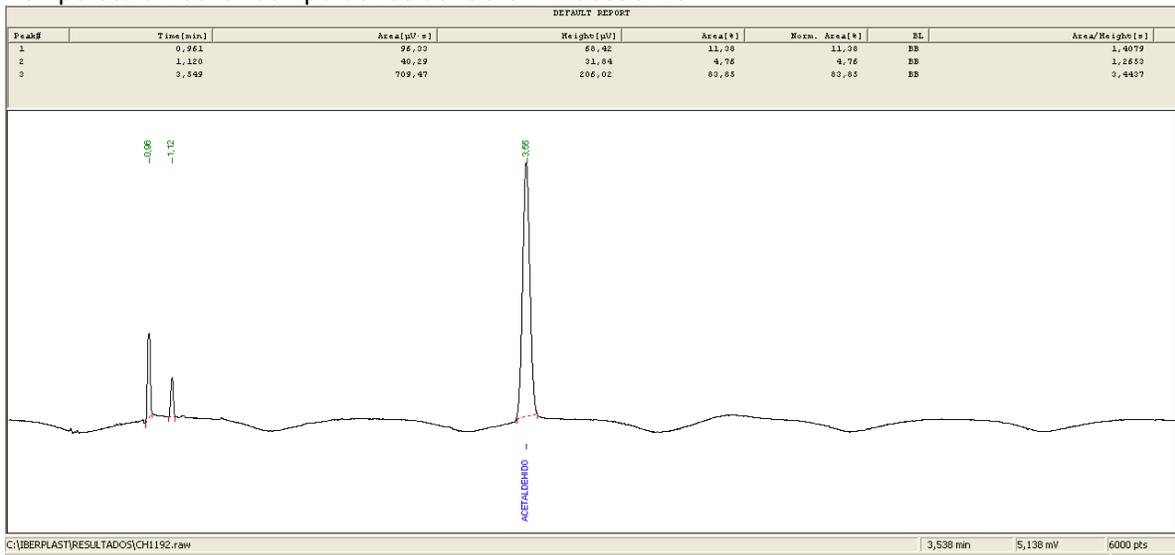
Temperatura 165°C- tiempo de residencia 3h- Muestra N1



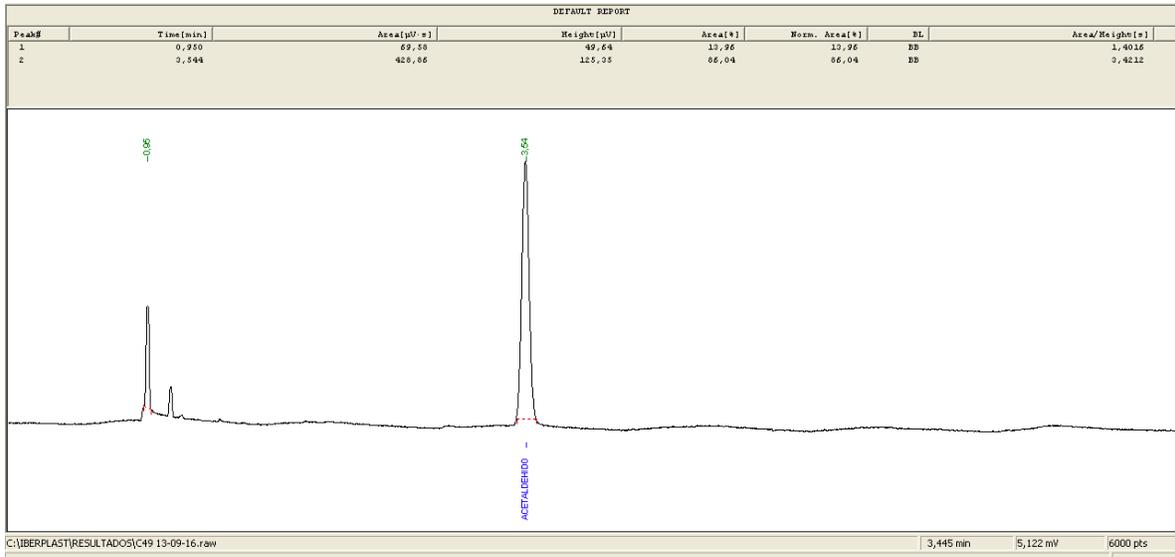
Temperatura 165°C- tiempo de residencia 3h- Muestra N2



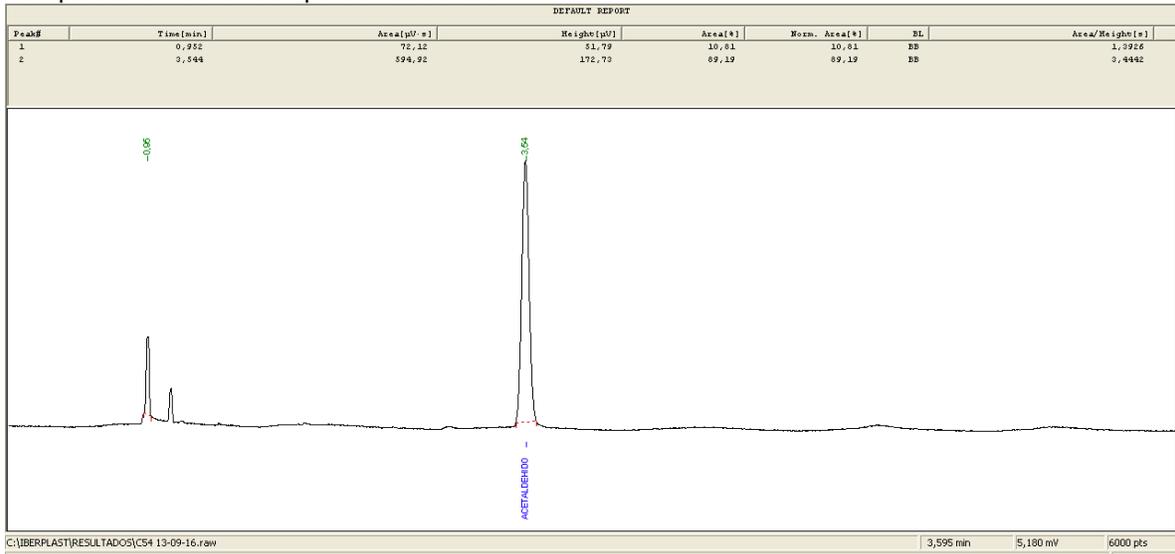
Temperatura 165°C- tiempo de residencia 3h- Muestra N3



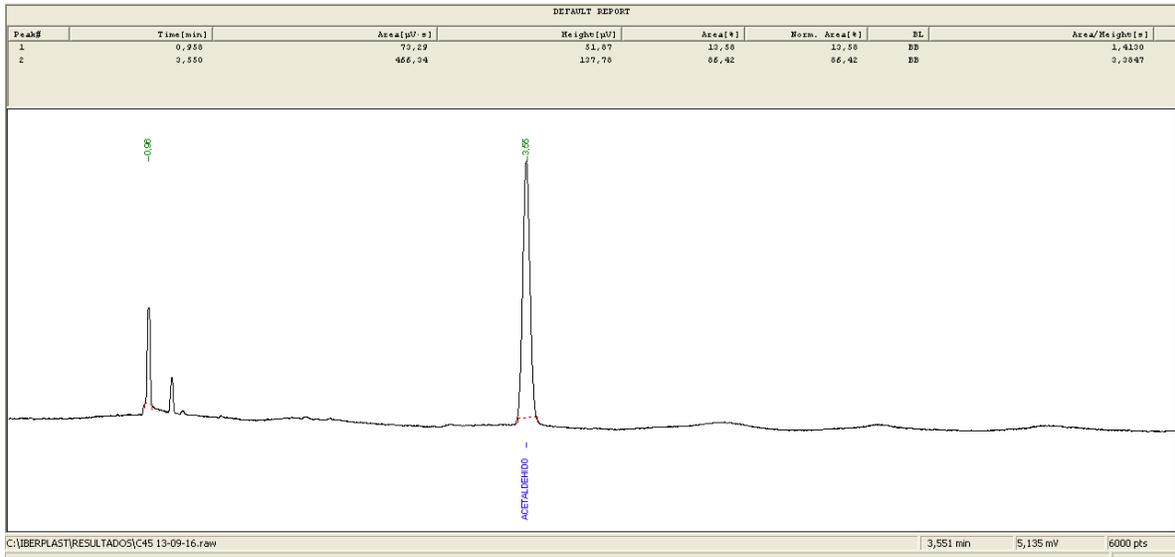
Temperatura 165°C- tiempo de residencia 4h- Muestra N1



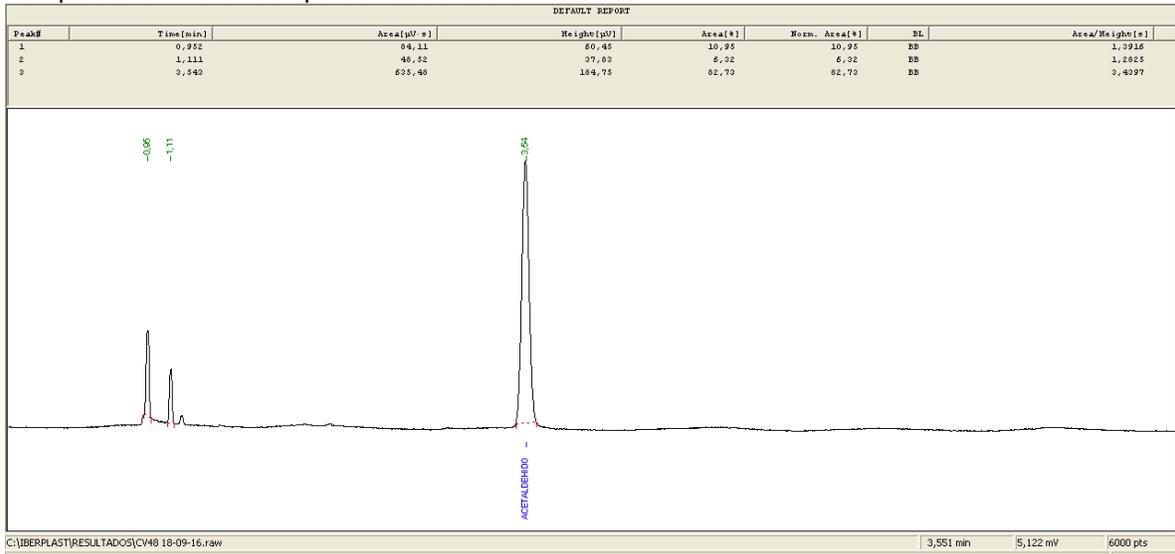
Temperatura 165°C- tiempo de residencia 4h- Muestra N2



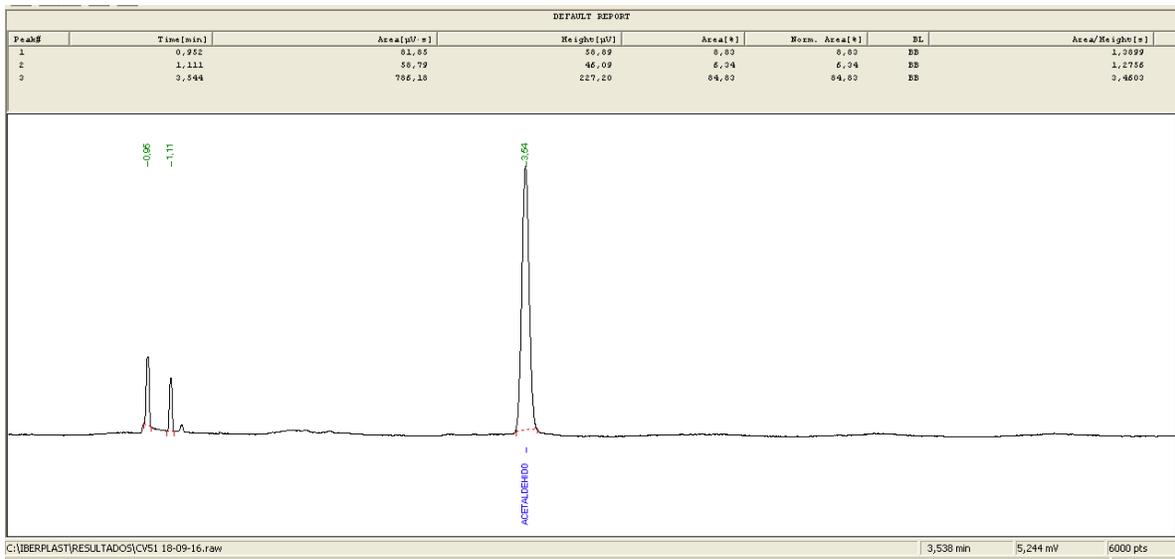
Temperatura 165°C- tiempo de residencia 4h- Muestra N3



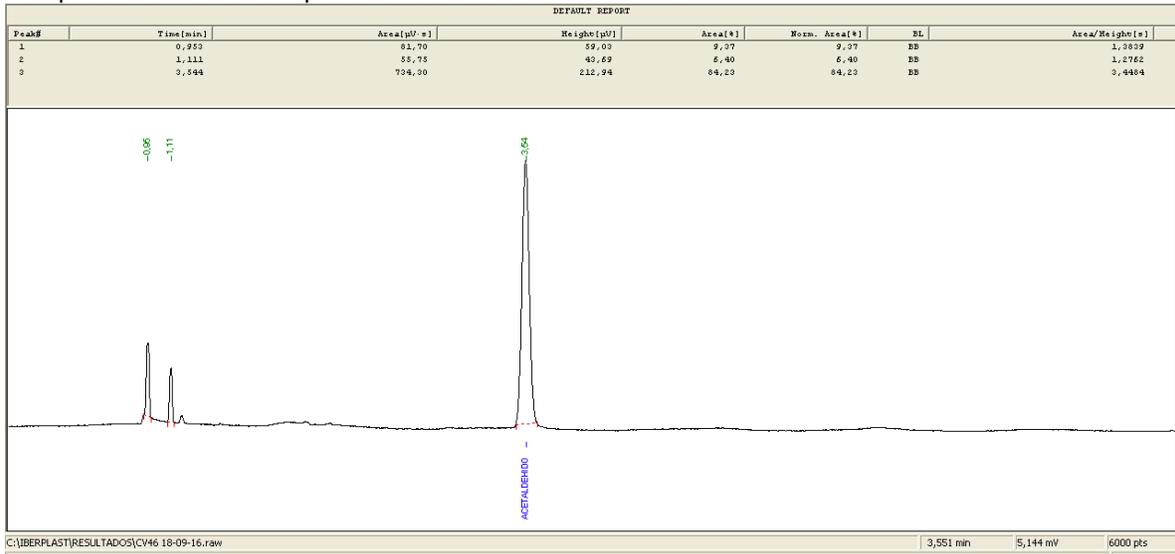
Temperatura 175°C- tiempo de residencia 3h- Muestra N1



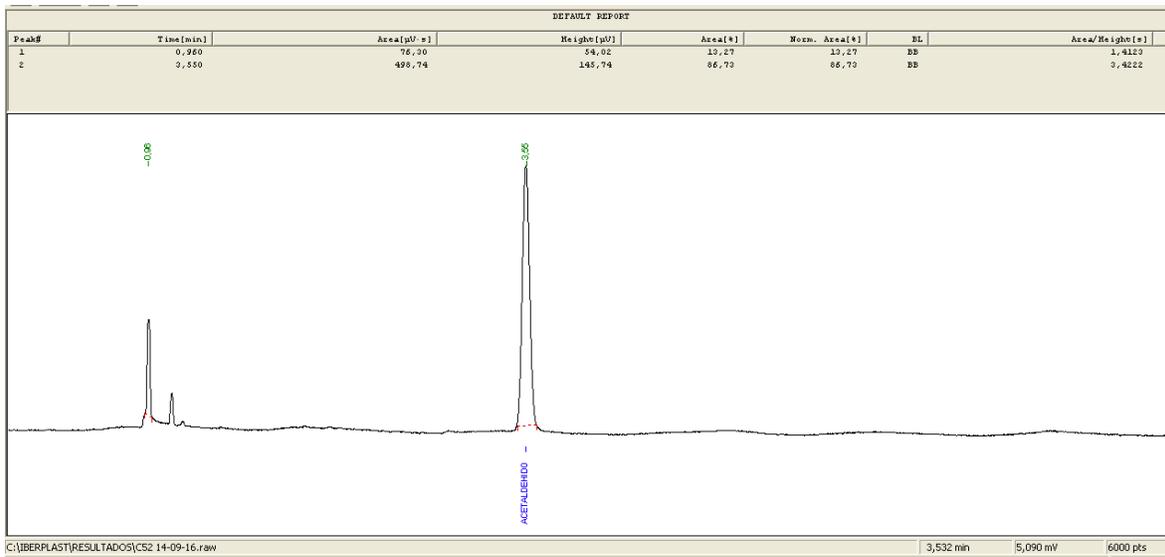
Temperatura 175°C- tiempo de residencia 3h- Muestra N2



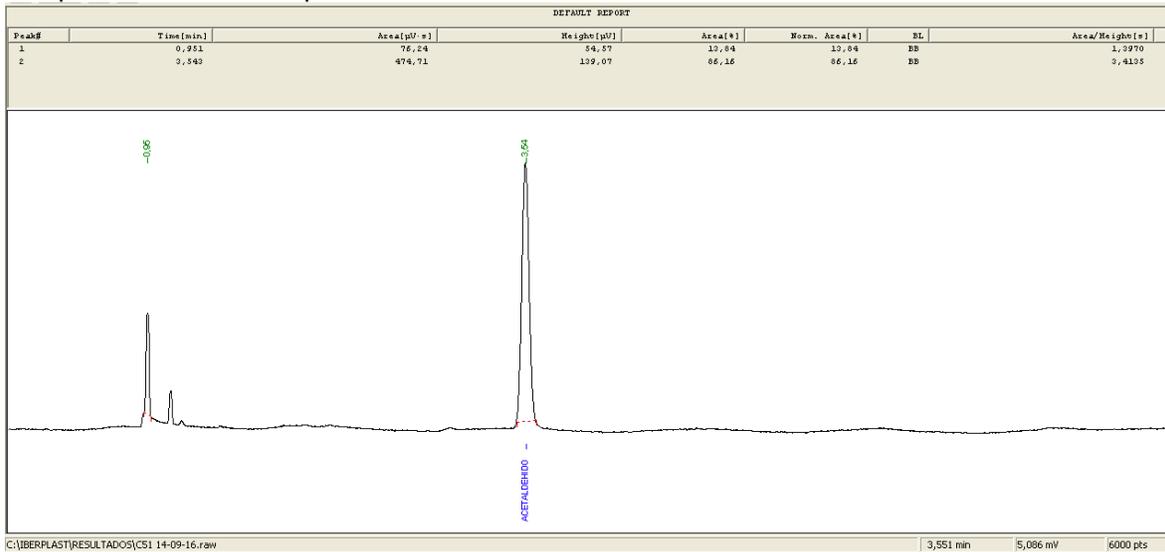
Temperatura 175°C- tiempo de residencia 3h- Muestra N3



Temperatura 175°C- tiempo de residencia 4h- Muestra N1



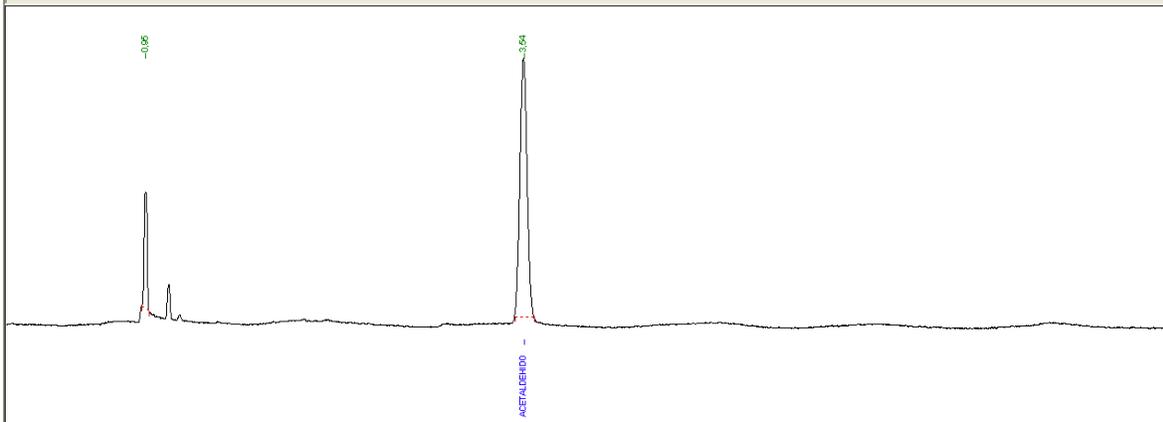
Temperatura 175°C- tiempo de residencia 4h- Muestra N2



Temperatura 175°C- tiempo de residencia 4h- Muestra N3

DEFAULT REPORT

Peak#	Time[min]	Area[μV*s]	Height[μV]	Area[%]	Norm. Area[%]	DL	Area/Height[s]
1	0,952	76,11	54,40	15,62	15,62	BB	1,3970
2	3,544	411,06	120,60	84,38	84,38	BB	3,4061



C:\IBERPLAST\RESULTADOS\C43 14-09-16.raw

3,551 min

5,071 mV

6000 pts