
**Obtención de productos de mayor
valor agregado por pirólisis de
policarbonato con catalíticos
inorgánicos utilizando el material de
reciclaje del ITCR**

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Vicerrectoría de Investigación y Extensión
Dirección de Proyectos

Floria Roa Gutiérrez, Ph.D.
Jaime Quesada Kimsey, Ph.D.
Aura Ledezma Espinoza, MGA
Ricardo Starbird Pérez, M.Sc.

Informe Final
Mayo 2011

Tabla de contenidos

Tabla de contenidos.....	2
Índice de figuras	3
Índice de cuadros.....	3
Documento 1	
Título de proyecto	4
Información sobre Autores.....	4
Resumen.....	4
Palabras clave.....	5
Introducción	5
Metodología	7
Recolección de material.....	7
Pre-tratamiento de muestra	7
Pirólisis	8
Caracterización del aceite de pirolisis.....	9
Resultados	9
Recolección de policarbonato	9
Molienda de la muestra.....	9
Pirólisis	9
Propiedades físicas.....	10
Propiedades químicas	10
Discusión y conclusiones	11
Recomendaciones	13
Agradecimientos	13
Bibliografía	14
Documento 2	
Datos generales	15
Nombre del proyecto	15
Escuela responsable	15
Otras escuelas colaboradoras	15
Instituciones colaboradoras externas al ITCR	15
Investigadora coordinadora.....	15
Investigadores colaboradores.....	15
Período de ejecución.....	15
Cumplimiento de objetivos	16

Cumplimiento del plan de difusión.....	18
Limitaciones y problemas encontrados.....	18
Observaciones generales y recomendaciones	18

Índice de Figuras

Figura 1. Cadena de Policarbonato	6
Figura 2. Algunos fragmentos posibles por degradación de policarbonato	6
Figura 3. Pirolizador experimental.....	8
Figura 4. Discos compactos después de molienda	9
Figura 5. Muestra de aceite de pirolisis de policarbonato.....	10

Índice de cuadros

Cuadro 1. Autores y direcciones	4
Cuadro 2. Viscosidad del aceite de pirólisis obtenido y algunos combustibles típicos .	11
Cuadro 3. Poder calórico de algunas biomásas, materiales y combustibles	12
Cuadro 4. Cumplimiento del Plan de Acción.....	16

Titulo del proyecto

Obtención de productos de mayor valor agregado por pirólisis de policarbonato con catalíticos inorgánicos utilizando el material de reciclaje del ITCR

1. Cuadro 1. Información sobre autores

Nombre Grado académico Especialidad	Grado académico	Jornada en el proyecto (hrs/sem)	Nº de meses en el proyecto	Tipo de plaza*
Floria Roa Gutiérrez	Ph.D.	4 (coordinadora)	18	VIE
Jaime Quesada Kimsey	Ph.D.	4 12	14(01/2009-02/2010) 4 (04/2010-06/2010)	VIE
Ricardo Starbird Pérez	M.Sc.	8	14(01/2009-02/2010)	VIE
Aura Ledezma Espinoza	Máster en Legislación y Gestión Ambiental MLGA	8	14(01/2009-02/2010)	VIE
Ana Lía Camacho Fidalgo	Estudiante de Ingeniería Ambiental	8	02/2010-11/2010	Asistente especial, colaboró en la preparación de muestra, construcción del pirolizador de caída libre y mediciones calorimétricas, entre otras

2. Resumen

Se evaluó la pirólisis de policarbonato proveniente de discos compactos desechados en el ITCR. En un pirolizador de escala de laboratorio, de aproximadamente 15 mL de capacidad, se realizó pirólisis rápida a 570°C. La fuente de calor fue un baño en sal fundida, utilizado para la nitruración de aceros. Los condensables fueron recolectados tras un enfriar a 0°C en un condensador de trayectoria espiral de 50 cm de longitud sumergido en agua de hielo. El rendimiento del aceite de pirólisis fue de 85%. Inicialmente el aceite mostró una sola fase, olor fuerte a fenol y a estireno, y coloración negra. Sin embargo luego de algunas semanas se separan 3 fases. La viscosidad global fue de 12 cSt (por tratarse de una mezcla heterogénea). El contenido calórico del aceite de pirólisis resultante fue de 33,4 kJ/g, ligeramente menor al de un diesel comercial que presenta valores entre 42,6-45,6 kJ/g. Se requiere de otro pirolizador experimental para poder evaluar la catálisis de zeolitas en la pirólisis. La caracterización química del aceite de pirólisis requiere mayor estudio para determinar el grado de fraccionamiento. Sin esta información la evaluación con

catalizadores inorgánicos pierde sentido y se debe dejar para una investigación posterior, así como la evaluación del valor comercial.

3. Palabras clave

Policarbonato, pirólisis, valor energético, reciclaje, valorización.

4. Introducción

Los plásticos, por su composición y su origen derivado del petróleo son una materia prima agotable, son un residuo de alto valor, relativamente fácil de recuperar y abundante (tanto o más que el vidrio en los residuos domésticos y creciente entre los residuos industriales). Sin embargo, el porcentaje de recuperación del plástico utilizado en diferentes sectores industriales es muy bajo. La explicación de esta situación se debe a varios motivos: (1)

- El envase plástico no es retornable como las botellas de vidrio (por ejemplo, las experiencias de retornos con el plástico de PET llevado a cabo en Alemania se han abandonado por su ineficacia).
- Su baja densidad eleva el costo de transporte, haciendo imprescindible su rotura para el transporte a los centros de reciclaje.
- La diversidad de materiales plásticos, de diferente composición, exige una separación en familias antes de ser reciclado, complicando la recolección selectiva. (1)

Una opción para la recuperación de moléculas de valor agregado (monómeros que pueden volver a emplearse en la síntesis de polímeros) es el reciclado químico. Su objetivo general es el aprovechamiento integral de los elementos constitutivos del plástico, por transformación del mismo en hidrocarburos, los cuales pueden ser materias primas integrables nuevamente en la ruta de obtención de plásticos o en otras rutas de la industria petroquímica. (1)

En USA y en Europa se han desarrollado procesos de pirólisis térmica en reactores rotatorios y de lecho fluidizado. Esta última es la tecnología más desarrollada (Albrigh y cols., 1983; Scott y cols., 1990; Kaminsky, 1991, 1992; Kaminsky y Rössler, 1992; Conesa y cols, 1994; Kaminsky y cols., 1995; Williams y Williams, 1999) debido a que los lechos fluidizados ofrecen condiciones muy adecuadas para este proceso: 1) Elevada capacidad de transporte de calor y de materia entre fases, lo que reduce la energía requerida en un proceso que es fuertemente endotérmico. 2) Régimen isotermo y como consecuencia uniformidad de temperatura. 3) Reducido tiempo de contacto de los productos primarios de pirólisis (entre varios segundos y 1,5 min frente a los 20 min de los reactores rotatorios), lo que minimiza las reacciones secundarias de los productos primarios de la pirólisis y ofrece una mayor uniformidad del producto. (2)

Una de las variables en la obtención de sustancias de interés a partir de desechos es la temperatura. Al emplear temperaturas bajas se promueve la formación de subproductos líquidos, mientras que a altas temperaturas son generados gases como subproductos, considerando este parámetro, se puede obtener a partir de algunas matrices, hasta un 100% de rendimiento en la de generación de monómeros. (3)

Otra variable de interés es el uso de catalizadores, Angullo *et al* 2006, realizó pirólisis a una resina polimérica empleando Zeolitas como catalizadores, concluyendo que la porosidad de las mismas eran una variable que afecta el rendimiento en la obtención de diferentes fracciones de

subproductos (4). Ortega *et al* 2006, obtuvo gasolina con un 80% de rendimiento a partir de polietileno utilizando una zeolita de origen natural, además se obtuvo otras sustancias de interés empleando diferentes catalizadores.(5) Mientras que Balakrishnan *et al* 2005 empleó bajas temperaturas con un catalizador de óxido de hierro (III) para degradar la longitud de la cadena de cadena en poliestireno (6). Lin, Y.-H. et al 2007 determinó que la acción catalítica además de mejorar el rendimiento, puede contribuir con la selectividad del proceso, ofreciendo una mayor oportunidad de controlar los productos generados (7). Según Mosio-Mosiewski *et al* 2007, es posible obtener con catalíticos como aluminosilicatos mayor cantidad de productos de bajo punto de ebullición, más isoalcanos y más aromáticos (8).

El problema actual se enmarca en la falta de métodos de tratamiento o de aprovechamiento de desechos de consumo generalizado como lo es el policarbonato, para generar subproductos de valor agregado.

El policarbonato denominado **PC** en la industria de los plásticos es usado para crear lentes para todo tipo de gafas, como materia prima para CD, DVD y algunos componentes de los ordenadores, cristales antibalas y escudos anti-disturbios de la policía y en diseño y arquitectura (9).

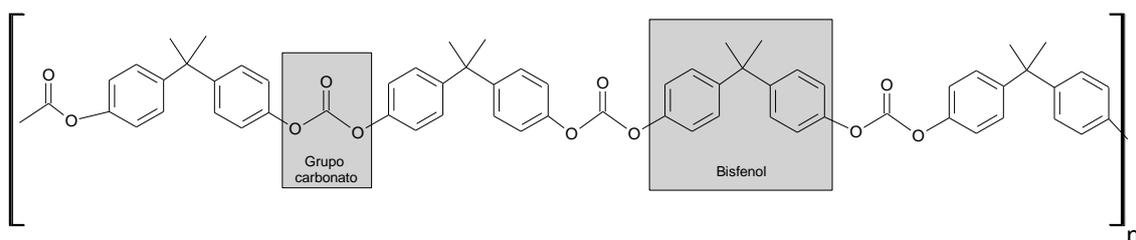


Figura 1. Cadena de policarbonato

Se puede predecir entonces que en una degradación térmica como la pirólisis, se producirá el bisfenol A, así como fragmentos de menor masa molecular provenientes del bisfenol como se reporta por Mc.Neil y Rincon (10-13), algunos de los cuales se muestran en la figura 2. El bisfenol ha sido estudiado ampliamente como un compuesto tóxico que se libera de artículos de policarbonato, cuyos efectos se asocian a alteraciones hormonales y carcinogenicidad. (14).

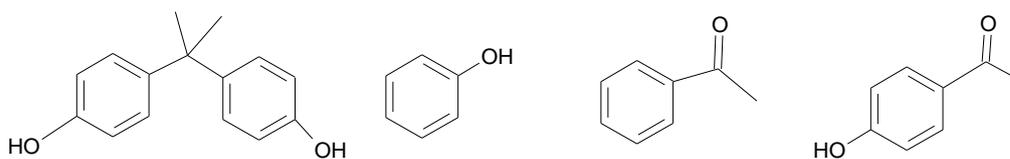


Figura 2. Algunos fragmentos posibles por degradación de policarbonato

Este proyecto sometió el material proveniente de discos compactos desechados en el ITCR a pirólisis en escala experimental para evaluar las características físicas y químicas del aceite de pirólisis resultante.

El objetivo general de este proyecto fue evaluar el uso del policarbonato recolectado en el ITCR en la obtención de subproductos de valor agregado mediante pirólisis (ver objetivos específicos

en el cuadro 4). Es importante anotar que ante la crisis energética que se presenta como fenómeno global, el uso del aceite de pirólisis resultante **puede definitivamente ser un combustible alternativo.**

5. Metodología

Recolección de material

Se inició en febrero de 2009 la campaña de recolección de CDs y DVDs como material fuente de policarbonato, con la cooperación de los estudiantes de Laboratorio de Química Básica I durante el semestre del curso. Adicionalmente se recibió material en el Centro de Transferencia y Transformación de Materiales (CTTM) del TEC, en la Zona Industrial de Cartago, proveniente de compañías que operan en el lugar. La campaña de recolección tuvo una duración total de 3 meses. En el período 05 de febrero al 13 de marzo de 2009, se recolectó una muestra inicial, conformada por 3 kg de DVDs y 8 kg de CDs. La segunda muestra se recolectó en el período del 13 de marzo al 8 de abril, con un total de 25 kg de material mezclado con CDs, DVDs. y empaques de policarbonato. De la totalidad de las muestras un 70% se recolectó del curso de Laboratorio de Química 1 y el resto provino del CTTM.

Pre-tratamiento de la muestra

Los discos compactos recolectados se sometieron a un proceso de molienda que se realizó en el CTTM, la primer muestra se procesó el 13 de marzo de 2003, con un molino industrial, marca PEGANI MR, modelo 2550.CH y criba de 10 mm de diámetro (50 cm largo x 45 cm ancho), para así reducir y homogenizar el tamaño de partícula. La separación de la materia prima se hizo para una posible caracterización individual del material proveniente de CDs y el de DVDs. La segunda muestra se procesó nuevamente en el CTTM, el 8 de abril bajo las mismas condiciones de equipo. La película metálica reflectiva quedó removida de los fragmentos en su mayor parte, debido al proceso de molienda.

En una segunda fase, se redujo el tamaño de partícula a menos de 1 mm de diámetro y mediante tamices, se seleccionó el material de tamaños entre 0,6 mm y 1,0 mm. La película metálica que aún persistía en parte del material quedó removida y se separó del plástico con una corriente de aire.

Pirólisis

Este proyecto fue planteado aprovechando un proyecto ya existente en pirólisis de biomasa (15), por lo que la propuesta original planteaba el uso del pirolizador a construir en ese proyecto, por parte de los investigadores de la UNA. Sin embargo, la construcción del pirolizador no se concretó, por lo que se optó por trabajar con un pirolizador construido en el ITCR, de escala experimental descrito en la figura 3.

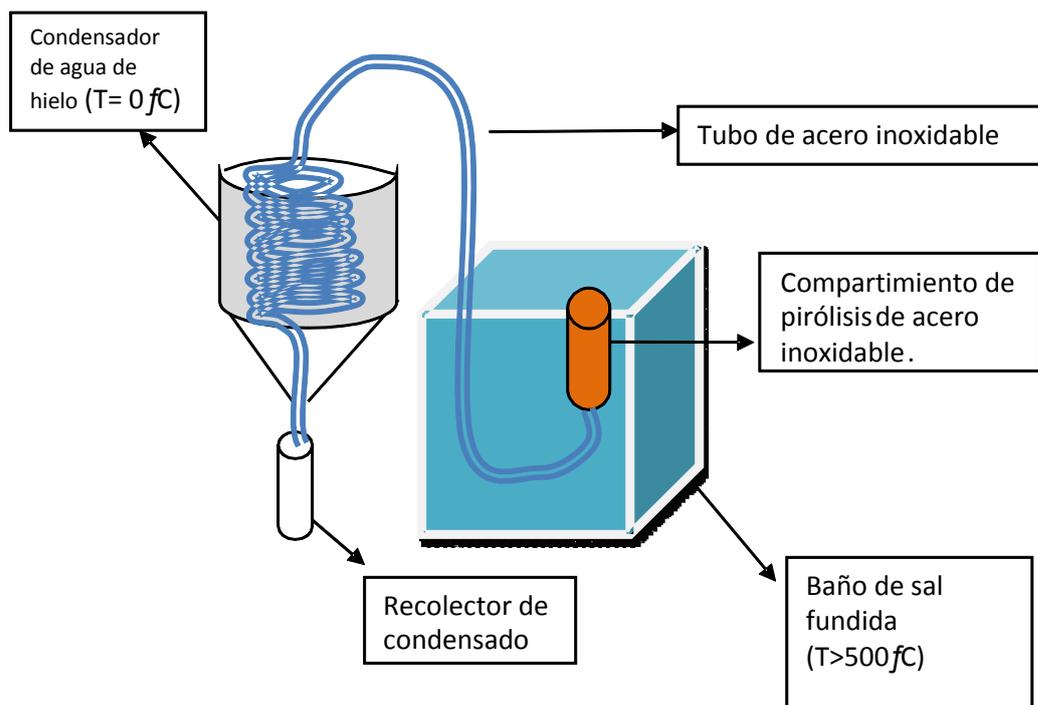


Figura 3. Pirolizador experimental

El pirolizador se cargó cada vez con muestra, luego de remplazar el filtro de fibra de acero colocado en la salida del compartimiento de pirólisis (anaranjado en el esquema), el cual se sumergió gradualmente en el baño de sal fundida hasta completar la reacción, proceso que duró aproximadamente 30 segundos en cada ocasión. La cantidad de muestra utilizada fue cercana a 5 g de policarbonato tamizado con un tamaño de partícula de 0,6 a 1,0 mm.

La condensación se realizó mediante un condensador de espiral en contacto con agua de hielo con una longitud de 50 cm aproximadamente. La recolección de la fracción condensable se hizo en un vial de aproximadamente 50 mL.

Este modelo de pirolizador tiene algunas desventajas prácticas con respecto a uno con alimentación continua, entre ellas que se obstruye rápidamente, que el tiempo invertido por cantidad de muestra es muy alto, y que el tiempo de pirólisis no es exactamente igual para todo el material de la muestra, debido a su volumen y a la velocidad de transferencia de calor a través del material. Adicionalmente, las condiciones que se tenía contemplado estudiar como variables resultaron en este prototipo condiciones fijas, tales como la temperatura de 570°C (baño de sal fundida) y el contacto de los vapores con superficies que pudiesen ejercer una acción catalítica.

Adicionalmente, las condiciones que se tenía contemplado estudiar como variables resultaron en este prototipo condiciones fijas, tales como la temperatura de 570°C (baño de sal fundida) y el contacto de los vapores con superficies que pudiesen ejercer una acción catalítica. Debido a la configuración del pirolizador, no se introdujeron catalizadores (en polvo) para que el pirolizado pasase a través de ellos. Un material inorgánico polvoso dentro del sistema hubiese incrementado los problemas de bloqueo que tuvimos y hubiese dañado el aparato en forma permanente.

Caracterización del aceite de pirólisis

Las propiedades físicas que se determinaron del aceite resultante fueron color, olor y viscosidad. La viscosidad fue determinada en el CIVCO (ITCR) en un viscosímetro de bola tipo Hubbelohde, con una columna capilar CANNON modelo 300, número de serie G587.

Las propiedades químicas que se determinaron fueron contenido calórico (bomba calorimétrica, CEQIATEC-ITCR), contenido de agua por el método Karl-Fischer y número ácido total (realizados en el CELEQ-UCR).

Las muestras fueron combinadas debido a que no existía diferencia en las condiciones en cada una de las pirólisis realizadas, y se requería una cantidad de material para la determinación de viscosidad.

6. Resultados

Recolección de policarbonato

Durante las 12 semanas de la campaña de recolección realizada desde el 05 de febrero al 08 de abril se recibieron 36 kg de discos compactos. Comprobando que es un material de desecho importante a nivel institucional. Es importante mencionar que el grupo de interés al cual se dirigió la campaña no incluyó a toda la comunidad institucional, por ende la cantidad recolectada es significativa para solo haberse recibido en su mayoría por parte de los estudiantes del curso de Laboratorio de Química Básica 1.

Molienda de la muestra

El material molido tiene la particularidad de que la mayor parte de la película metálica reflectiva queda desprendida, y se puede separar fácilmente del plástico.



Figura 4. Discos Compactos después de molienda

Pirólisis

Se midió en dos casos el rendimiento de la reacción, con resultados de 88% y 71%. En ambos casos quedó cerca de 28% de material residual. Sin embargo, en pruebas posteriores se halló que una parte importante del residuo en el reactor era condensado que quedaba en las paredes de las secciones menos calientes del reactor, de modo que el carbón remanente en el reactor realmente era aproximadamente 11% de la masa original. La suma de las masas de condensado y residuo fue mayor a 97% de la masa original, de modo que las pérdidas por formación de gases no condensables fue menor a 3%.

Propiedades Físicas

El aceite de pirólisis resultante se muestra en la figura 5. Inmediatamente después de obtenida, mostró una sola fase de color negro. Sin embargo, semanas más tarde se observaron 3 capas definidas por diferencia de densidad, la capa acuosa superior no constituía más del 5% en masa.

El olor es fuerte e irritante, característico de fenoles y estireno.

A pesar de que el producto de pirólisis obtenido corresponde a una mezcla compleja. Se determinó un valor de viscosidad cinemática global de (12 ± 1) cSt a 40°C . Por haber estado presentes varias fases en la muestra, se reporta este como un valor global.



Figura 5. Muestra de aceite de pirólisis de policarbonato

Propiedades químicas

Contenido de agua reportado: $< 0,1$ % m/m

Contenido calórico: $(33,4 \pm 0,7)$ MJ / kg.

Número ácido total reportado: $(0,3 \pm 0,1)$ mg NaOH / g.

7. Discusión y conclusiones

Por lo pronto se ha logrado obtener del policarbonato, mediante pirólisis, un producto de valor agregado que es un combustible líquido. El rendimiento del producto, que se acerca a 90%, es un factor altamente atractivo. La pérdida por carbonización es un aspecto que dificultó la obtención de producto debido al diseño del reactor que se tuvo que emplear, el cual se bloqueaba con el carbón formado durante la reacción. Esta dificultad se evita utilizando otros diseños, como el del nuevo pirolizador de caída libre que está en pruebas finales actualmente en el laboratorio del CIPA.

El producto obtenido en definitiva puede ser utilizado como combustible alternativo. El contenido calórico medido en el aceite obtenido es aproximadamente 20% menor que el del diesel comercial, lo cual hay que tener en cuenta al emplearlo. La viscosidad global del aceite producido es intermedia entre las del diesel y del diesel pesado (ver cuadro 2), por lo cual el bombeo y transporte en tuberías industriales típicas no ofrecería ninguna dificultad.

Cuadro 2. Viscosidad del aceite de pirólisis obtenido y algunos combustibles típicos.

Combustible	Temperatura	Desde	Hasta	Promedio
	°C	cSt	cSt	cSt
Diesel RECOPE	40	0,04	4,26	2,27
Diesel norma CR	40	1,9	5	
Pirolizado de policarbonato ITCR	40	12	12	12
Diesel pesado / gasoleo RECOPE	40	10,7	24	16,6
Fuel-oil RECOPE (búnker)	50	131	221	185
Fuel-oil norma CR	50		300	

El producto obtenido en definitiva puede ser utilizado como combustible alternativo. El contenido calórico medido en el aceite obtenido es aproximadamente 20% menor que el del diesel comercial, lo cual hay que tener en cuenta al emplearlo. Nótese que, sin embargo, el contenido calórico es relativamente alto, incluso mayor que el del policarbonato.

La viscosidad global es intermedia entre las del diesel y del diesel pesado (ver cuadro 2), por lo cual el bombeo y transporte en tuberías industriales típicas no ofrecería ninguna dificultad. En el siguiente cuadro se muestra el calor de combustión del producto junto con el de otros combustibles comunes y otros materiales evaluados aquí en el Tec.

Cuadro 3. Poder calórico de algunas biomásas, materiales y combustibles.

Combustible	Poder calórico (MJ / kg)	Fuente de información
Cogollo caña seco	16,8	Medición propia
Carbón de RAC de piña	20,6	Medición propia
Pasto seco	16,3	Medición propia
Broza seca	16,5	Medición propia
Polietileno	43,5	Administración Federal de Aviación, EEUU (FAA) http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/ar072.pdf
Poliestireno	39,8	
Polimetilmetacrilato	24,9	
Polioximetileno	15,1	
Terftalato de polietileno	21,8	
Policarbonato	29,8	
Pirolizado de policarbonato	33,4	Medición propia
Búnker	41,3 a 41,9	RECOPE http://www.recope.go.cr/nuestra_actividad/calidad_empresarial/PODER_CALORICO.htm
Diesel	42,6 a 43,2	
Keroseno	43,1 a 43,2	
Gasolinas	43,5 a 47,7	
Gas Licuado de Petróleo (LPG)	46 a 50	

El retraso de las actividades debido a la carencia de un pirolizador, ocasionó que no hubiese aceite de pirólisis disponible sino hasta avanzado el segundo semestre del 2010, ya muy tardíamente para emprender las labores de identificación de componentes principales. Al tratarse de una mezcla compleja, con 3 fases y además con partículas sólidas, la identificación de componentes principales requiere de una cantidad importante de trabajo meticuloso, para evitar causar daño a los instrumentos. Esto no ha sido posible hacerlo hasta el momento, y por ello queda entre los pendientes.

El olor del aceite, sin embargo, confirma lo reportado por otros investigadores de la degradación térmica del policarbonato, y esto es, que hay presencia de fenoles. El olor de estireno, sin embargo, aún no se explica y habrá que esperar para ello a que se realicen los análisis del caso.

La mezcla probablemente contenga proporciones altas de algunas sustancias que, tras un paso de separación (por destilación fraccionada, por ejemplo), podrán tener valor agregado considerablemente mayor que el combustible. Este aspecto se debe valorar aunque sea a posteriori, ya que en breve estará disponible un pirolizador de escala de laboratorio, que permitirá obtener más producto de manera más simple y reproducible. Así mismo, este nuevo

reactor permitirá pasar los vapores, producidos durante la pirólisis, por catalizadores a temperatura controlada, con lo cual se podrá variar la composición del pirolizado.

Igualmente podrán evaluarse otros plásticos que comúnmente se desechan en grandes cantidades, como el polietileno, el poliestireno, el PET (botellas) y el polipropileno.

8. Recomendaciones

- Separar las fases del aceite de pirolisis obtenido y caracterizarlas químicamente.
- Eliminar el agua de la mezcla para reevaluar estabilidad y contenido calórico.
- Terminar la optimización del pirolizador de caída libre, con el fin de poder realizar pruebas más fácilmente a diversos materiales, entre ellos el policarbonato.
- Probar la pirólisis del policarbonato con catalizadores diversos para evaluar las sustancias obtenidas y su rentabilidad potencial.

9. Agradecimientos

La estudiante Ana Lía Camacho Fidalgo contribuyó en este proyecto en diversas labores, entre las cuales se pueden mencionar:

- Obtención de pirolizado
- Evaluación de contenidos calóricos
- Búsquedas de informaciones
- Reparaciones del pirolizador
- Diseño y construcción de algunas partes del pirolizador de caída libre
- Evaluación de opciones de adquisición de datos para el pirolizador de caída libre
- Discusión crítica y generación de ideas

Se le agradece a Ana Lía su valiosísima contribución, marcada siempre por una disposición interesada en el progreso del trabajo y por un gran interés en la investigación.

Se agradece la colaboración de la Escuela de Ingeniería y Ciencia de los Materiales que nos facilitó el baño de sal fundida, que constituyó en un elemento clave en la realización de los objetivos de este proyecto.

Bibliografía

1. Arandes J., B. J., López Valerio D. *Revista Iberoamericana de Polímeros* **2004**, 5.
2. Hernández, M. *Ingeniería Química*, **2007**, Vol. Doctoral, pp. 259, Universidad de Alicante, Alicante.
3. Nunez, I. (*Chemie*, **2006**, Vol. Dr. rer. nat., pp. 116, Universität Hamburg, Hamburgo.
4. Agullo J., K. N., Berenguer D., Kubicka D., Marcilla A., Gómez A., Salmi T. Yu. Murzin D. *Kinetics and Catalysis*, **2007**, 48,(4), pp.335.
5. Ortega D., N. L., Aguilar J., Hernandez I., Ramires V. *Revista mexicana de Ingeniería Química*,**2006**, 5, 189-195.
6. Balakrishnan R., G., C. *Polymer degradation and stability*, **2007**, 92, 1583-1591
7. Lin Y., Y. M. *Polymer degradation and stability*, **2007**, 92, 813-821
8. Mosio-Mosiewski J., W., M. , Morawski I , Dobrzanski T. *Fuel Processing Technology*, **2007**, 88, 359-364.
9. Cháves-Villarreal, C. (2010) **Conversión de productos poliméricos a combustibles**, ITCR-RECOPE, Trabajo final de Graduación, Ing. y Ciencia de los materiales, pp. 13
10. McNeill, I. C., and A. Rincon, *Polym. Degrad. and Stab.*, **31**, 163, 1991.
11. McNeill, I. C., and A. Rincon, *Polym. Degrad. and Stab.*, **39**, 13, 1993.
12. <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-05142001-92334/unrestricted/chapter1.pdf>
13. Jang, B.N.; Wilkie, C.A. *Thermochimica Acta* Volume 426, Issues 1-2, February 2005, pp. 73-84.
14. <http://isfd78-integracionareal.blogspot.com/2008/05/polimeros-efectos-y-aplicaciones-del.html> (17 de abril, 2011)
15. Roa F., Quesada. J., Jimenez G.; Sasa J. (2007), pp. 21, CONARE, San José.

DOCUMENTO 2

1. Datos generales

1.1 Nombre del proyecto

Obtención de productos de mayor valor agregado por pirólisis de policarbonato con catalíticos inorgánicos utilizando el material de reciclaje del ITCR

1.2 Escuela responsable **Química adscrito a CIPA y CEQIATEC**

1.3 Otras escuelas participantes

Aunque no tuvieron una participación con investigadores en la propuesta, reconocemos la colaboración

El Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO) quienes nos facilitaron el viscosímetro y la Escuela de Ingeniería y Ciencia de los Materiales, quienes nos facilitaron el uso del baño de sal fundida como fuente de calor.

1.4 Instituciones colaboradoras externas al ITCR

Realizaron el análisis del contenido de agua por Karl-Fisher y la acidez total de la muestra de aceite pirolizado

Laboratorio del Centro de Energía y Electroquímica (CELEQ) de la UCR

1.5 Investigadora coordinadora

Dra. Floria Roa Gutiérrez

1.6 Investigadores colaboradores

Dr. Jaime Quesada Kimsey

M.Sc. Ricardo Starbird Pérez

MLGA. Aura Ledezma Espinoza

1.7 Período de ejecución

Enero 2009-Diciembre 2010 (2 años)

2. Cumplimiento de objetivos

Cuadro 4. Cumplimiento del Plan de Acción

Objetivo	Productos	Actividades	Cumplimiento
1. Recolectar en las instalaciones del ITCR mediante el uso de las baterías de recolección existentes muestras de policarbonato de desecho.	1.1. Material de desecho constituida de policarbonato. 1.2. Partículas con dimensiones máximas de 1 cm.	1.1. Cotización de reactivos y materiales 1.2. Recolección por medio de una campaña de corta duración de una muestra representativa de PC. 1.3. Homogenizar el material recolectado en el TEC.	100%
2. Cualificar los subproductos obtenidos por un proceso de pirólisis a con la presencia de catalizador	2.1 Fracciones de material pirolizado. 2.2 Caracterización de las fracciones generadas en el pirolizador.	2.1. Realizar la pirólisis en el policarbonato recolectado para obtener fracciones de subproductos mediante un diseño de experimento. 2.2. Determinar el producto con mayor valor agregado obtenido por pirólisis.	80% Debido a las cantidades recolectadas con el pirolizador alternativo. Los productos de pirólisis de policarbonato fueron combinados para poder determinar las propiedades físicas y químicas preliminares (acidez total, contenido de agua, viscosidad, calor de combustión). El fraccionamiento solo deberá ser realizado en una etapa posterior. Ya que se requería un volumen de aceite de cerca de 50 mL. El fraccionamiento se realizará por destilación fraccionada.
3. Determinar experimentalmente las condiciones óptimas de pirólisis en la producción de moléculas de mayor valor agregado.	3.1 Fracciones de material pirolizado. 3.2 Cuantificación de las fracciones generadas en el pirolizador con mayor porcentaje de moléculas de valor agregado.	3.1. Determinar los factores óptimos en temperatura, catalizador, alimentación y tiempos de estadía para mejorar el rendimiento de la molécula de mayor valor agregado. 3.2. Cuantificar las fracciones de los subproductos obtenidos por medio de cromatografía de gases con detector de masas	El pirolizador alternativo no permite controlar las condiciones, no es posible optimizar en esta etapa. El aceite producido será fraccionado y de ser posible caracterizado por espectroscopía infrarroja y GC/MS. Sin embargo, es importante anotar que se trata de una mezcla relativamente compleja. El objetivo no debe incluirse en la ponderación debido a las dificultades enfrentadas con construcción del pirolizador quedaban fuera del control de los investigadores.

Objetivo	Productos	Actividades	Cumplimiento
4. Plan de difusión e informes	<p>4.1 Un artículo informativo en INFORMATEC o en un medio de comunicación masivo</p> <p>4.2 Al menos dos publicaciones en "Tecnología en Marcha"</p> <p>4.3 Al menos 1 participación con ponencia en un Congreso Nacional</p> <p>4.4 Informe de avance</p> <p>4.5 Informe final</p>	<p>4.1 Artículo de divulgación del proyecto, su importancia y la participación en la campaña de recolección de productos de policarbonato (INFORMATEC y/o medio de comunicación masivo)</p> <p>4.2 a Preparación de un artículo técnico-científico relativo a los resultados del objetivo 2, caracterización de los productos resultantes de la pirólisis de policarbonato</p> <p>4.2 b Preparación de un artículo técnico-científico con los resultados del objetivo 3 optimización de condiciones y catalizadores de pirólisis</p> <p>4.3 Revisión de eventos científicos relacionados con el tema para la preparación de ponencias</p> <p>4.4 Preparación de informe de avance</p> <p>4.5 Preparación de informe final</p>	<p>77% GENERAL</p> <p>4.1 Aunque no se publicó en INFORMATEC si se hizo a nivel de en la intranet (80%)</p> <p>4.2 a. Se tienen los antecedentes, revisión bibliográfica pertinente, resultados tabulados y discusión de los mismos, sólo queda pendiente darle el formato (80%)</p> <p>4.2.b Imposible de publicar resultados de optimización y catalizadores ya que el pirolizador utilizado carecía de elementos de control y reservorio para catalizadores.(0%)</p> <p>4.3 Realizado en forma continua (100%)</p> <p>4.4 Realizado (100%)</p> <p>4.5 Realizado (100%)</p>

3. Cumplimiento del plan de difusión
 - 3.1. Los resultados obtenidos serán publicados en un artículo científico preferiblemente en Tecnología en Marcha.
 - 3.2. Adicionalmente, la alternativa energética de pirólisis ha sido ampliamente discutida en el curso de Química Orgánica y Bioquímica, incluyendo algunos resultados del proyecto en el tema de combustión de alcanos (combustibles fósiles) y otros combustibles.
 - 3.3. Los conceptos básicos sobre pirólisis fueron expuestos en el Encuentro de Investigación por el proyecto relacionado (Nov2008).
 - 3.4. La tecnología y diseño del pirolizador fue expuesto en la reunión de informes de proyectos FEES en la UNED (Diciembre, 2009).
 - 3.5. Cháves-Villarreal, Claudia. (2010) **Conversión de productos poliméricos a combustibles**, **ITCR-RECOPE**, Trabajo final de Graduación, Ing. y Ciencia de los materiales. Supervisión Dra. Floria Roa.

4. Limitaciones y problemas encontrados

Este proyecto fue derivado a partir de un proyecto de mayor alcance que pretendía diseñar un pirolizador de escala aproximada 300 g a 1 kg con un alimentador continuo. Por lo tanto las dificultades derivadas de la falta de cumplimiento del constructor del pirolizador en cuestión repercuten directamente en este proyecto.

Fue necesario rediseñar un pirolizador sin alimentador continuo para poder realizar al menos las pruebas preliminares de pirólisis con policarbonato. La escala es variable dependiendo de la densidad del material y del grado de subdivisión, pero con el material de policarbonato disponible se corrieron pirólisis de escala 5 g. Lo que hizo necesario una serie de repeticiones en las mismas condiciones para poder acumular aceite pirolizado suficiente para pasar a la fase de caracterización física y química (muestras para CELEQ y para medir viscosidad).

Otra dificultad enfrentada es que se tuvo que simplificar el diseño a tal grado que no se contó con un reservorio para exponer los gases calientes del aceite pirolizado a un material catalizador, con el fin de poder estudiar su efecto. Sin embargo, los catalizadores más convenientes fueron adquiridos después de una revisión bibliográfica y la cotización correspondiente ya que el factor de costo es importante cuando se analizan alternativas energéticas como en nuestro caso.

Es importante resaltar que el pirolizador utilizado finalmente fue construido en su totalidad por el Dr. Jaime Quesada, lo cual requirió de habilidades para el ensamblaje de las partes metálicas como soldadura que los otros investigadores no estaban en posibilidad de colaborar, y que quedaba fuera de los objetivos de este proyecto.

5. Observaciones generales y recomendaciones

En general, los investigadores consideramos que este tipo de proyectos que incluyen el diseño de equipo o maquinaria, son innovadores y muy importantes, pero que se podrían incentivar

mediante la construcción de un taller institucional, que cuente con operarios quienes con la guía especializada de los investigadores realicen el desarrollo tecnológico, y no se tenga que recurrir a contratar técnicos externos con quienes no sólo se pierde el detalle de la construcción y posibles modificaciones sobre la marcha, sino que se corren riesgos inminentes en lo que se refiere al cumplimiento de los contratos.