

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingeniería

Pirólisis del Policarbonato: Propuesta de Revisión Literaria

Karla Salomé Villarroel Díaz

Ingeniería Química

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniería Química

Quito, 20 de diciembre de 2021

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
Colegio de Ciencias e Ingeniería

HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

Pirólisis del Policarbonato: Propuesta de Revisión Literaria

Karla Salomé Villarroel Díaz

Nombre del profesor, Título académico

Daniela Almeida, Ph.D.
Juan Diego Fonseca, Ph.D.

Quito, 20 de diciembre de 2021

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Karla Salomé Villarroel Díaz

Código: 00201173

Cédula de identidad: 1600536898

Lugar y fecha: Quito, 20 de diciembre de 2021

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

El policarbonato (PC) es uno de los plásticos más usados para la producción de equipos eléctricos y electrónicos (EEE). Sin embargo, en comparación con otros tipos de plásticos, su descomposición es de las más lentas y emite contaminantes como su monómero, bisfenol A. En consecuencia, se investigan técnicas de reciclaje para disminuir su huella ambiental; una solución prometedora es la pirólisis por su fácil implementación. A pesar de que los estudios relacionados con la pirólisis del PC datan de hace 50 años, no se han encontrado revisiones literarias enfocadas en el tema. Este trabajo trata de la planificación de una revisión literaria (RL) sobre el desarrollo, aplicación y nuevas tendencias relacionadas a la pirólisis del PC que busca dar una cronología del estudio, ser una guía para futuros investigadores y determinar oportunidades de investigación. Para ello, se propone una revisión híbrida que toma en cuenta la metodología para revisiones narrativas (NRLs) y sistemáticas (SRLs). Finalmente, se concluyó que las RLs son útiles para guiar y ubicar a nuevos investigadores dentro de la cronología de investigación. Se resaltó la importancia de las NRLs para recuentos históricos y las SRLs para investigaciones enfocadas en comparar condiciones específicas.

Palabras clave: Pirólisis, policarbonato, poli bisfenol A, revisiones literarias, reciclaje termoquímico, plásticos.

ABSTRACT

Polycarbonate (PC) is one of the most widely used plastics for the production of electrical and electronic equipment. However, PC decomposes slower than other plastics and emits pollutants such as its monomer bisphenol-A. Consequently, some recycling techniques are investigated to reduce its environmental footprint. A promising solution is pyrolysis because of its feasibility. Though, no recent literature reviews focused on PC pyrolysis have been found. This work aims to design a literary review (RL) on the development, application, and new trends related to PC pyrolysis that seeks to chronologize, guide future researchers, and determine research opportunities. Thus, a combined literature review that considers the methodology for narrative (NRLs) and systematic (SRLs) reviews has been proposed. This study found that RLs are applicable to guide and place new researchers within the research chronology; it also highlighted the importance of NRLs for historical counts and SRLs for investigations focused on comparing specific conditions.

Keywords: Pyrolysis, polycarbonate, poly(bisphenol A carbonate), literary reviews, thermochemical recycling, plastics.

TABLA DE CONTENIDO

Índice de Tablas	6
1. Introducción	7
1.1. Revisiones Literarias.....	7
1.2. Problema de Investigación.....	8
1.2.1. El plástico, su problema y una solución.	8
1.2.2. El policarbonato y su reciclaje	9
1.2.3. Revisiones literarias sobre la pirólisis del PC	10
1.3. Justificación de la Investigación	10
1.4. Objetivos de la Investigación.....	11
2. Metodología	12
2.1. Metodología de “ <i>Historical and Theoretical Background on Polycarbonate Recycling</i> ”	12
2.2. Metodología de “ <i>Study of Operational Conditions</i> ” y “ <i>New Trends</i> ”	13
3. Conclusiones	16
Referencias Bibliográficas	17
Anexo A: Tabla Comparativa NRL vs SRL	20
Anexo B: Artículos Seleccionados para las Secciones 2 y 3	20

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Número de artículos en base a los comandos de inclusión/exclusión.....	14
Tabla 2. Número de artículos por fase	15

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Revisiones Literarias

Las revisiones literarias son investigaciones que permiten: determinar el alcance de un tópico, evaluar la literatura disponible, y dar una visión general y crítica sobre el tema de estudio [1]. Estas sintetizan el conocimiento que a nivel de comunidad científica se tiene sobre un tema; es por ello, que son necesarias cuando la información es abundante, dispersa, o los puntos de vista son divergentes; algo común dentro de una comunidad [2]. Por otro lado, es importante tener en cuenta que una revisión es una fuente secundaria, ya que es un compendio de los experimentos e investigaciones que se han realizado (fuentes primarias). De manera, que la calidad de la revisión está en función de la calidad de los artículos examinados [3].

Existen dos tipos de revisiones literarias estándares, diferenciadas por su metodología: sistemática (SLR) y narrativa (NLR) (Anexo A). Las SLRs se obtienen a través de una selección y evaluación metódica del universo de artículos que se encuentran en las bases de datos seleccionadas [1]. El criterio de selección depende de una única pregunta de investigación. Este tipo de revisión se caracteriza por su rigor en la selección de artículos, al ser clara, limitan el sesgo del investigador a cargo de la reseña. Una SRL puede comparar los artículos de manera cualitativa o cuantitativa, y solo puede ser llamada un meta-análisis cuando los artículos se comparan cuantitativamente [3].

Por otro lado, las NLRs son revisiones más generales, porque pueden responder a varias preguntas [2]. En consecuencia, la selección de artículos no es rigurosa, y puede no ser especificada, al contrario de las SLRs. La generalidad de estas revisiones las hace ideales para dar una visión amplia del estado de un tema y para hacer un recuento histórico [2]. Sin embargo, pese a que ambos tipos de revisiones están sujetas al sesgo del investigador por ser trabajos escritos; las NLRs, al no tener una metodología de selección clara, acarrear mayor sesgo [2].

En esta investigación se realiza una revisión literaria híbrida, la cual incluye una parte de revisión sistemática, SRL, y una narrativa, NRL, sobre el desarrollo, aplicación y nuevas tendencias relacionadas al estudio de la pirólisis del policarbonato (PC).

1.2. Problema de Investigación

1.2.1. El plástico, su problema y una solución.

Plástico es un término general usado para referirse a los polímeros sintéticos [4]. Estos, por su versatilidad y bajo costo de producción, forman parte en las actividades diarias de las sociedades modernas [5], por lo que su consumo ha aumentado aceleradamente en los últimos años. Gourmelon, G. reporta que desde 1950 hasta el 2012 el consumo de plásticos ha crecido en promedio 8.7% por año; es decir, incrementó de 1.7 Mt (millones de toneladas) en 1950 a cerca de 300 Mt en 2015 [6]. Sin embargo, pese a que continuamente se desarrollan aplicaciones para estos materiales, no se cuenta con métodos efectivos que gestionen los residuos plásticos.

En el 2017, se reportó una producción de 348 Mt de plástico, de las cuales 75% fueron desechadas ese mismo año [5]. Adicionalmente, de la cantidad desechada, solo el 18% se recicló, el 26% se incineró y el 56% restante fue depositado en vertederos [5]. La principal desventaja de la incineración y la acumulación en vertederos es la emisión de sustancias nocivas al ambiente (i.e. gases de efecto invernadero, aditivos, lixiviados) [7]. Por lo tanto, la forma más efectiva de disposición es el reciclaje. En la actualidad se estudian 3 tipos de reciclajes: físico, químico y termoquímico [8]. El primero es el menos deseable por el deterioro de las propiedades del material resultante. En el caso del reciclaje químico, este usa solventes y procesos adicionales que lo hacen muy costoso [8]. Finalmente, el reciclaje termoquímico (enfocado en la pirólisis) si bien produce varias sustancias que necesitan de la implementación de procesos de separación, es el método más conveniente para el escalamiento industrial [7].

La pirólisis es un método termoquímico que consiste en la degradación de moléculas grandes (polímeros) por el aumento de temperatura en ausencia de oxígeno [9]. Si bien es un método prometedor para tratar el desecho plástico, aún debe ser estudiado, ya que tiene poca selectividad y puede producir una amplia gama de productos [7]. Por otro lado, al ser un método que depende de la composición química del material debe ser estudiado en función del tipo de plástico, de esta manera se deben investigar las condiciones que favorecen su escalamiento industrial (i.e. condiciones de operación moderadas y selectividad).

1.2.2. El policarbonato y su reciclaje

El policarbonato (PC) es uno de los tipos de polímeros sintéticos con mayor crecimiento de uso, ya que es fundamental para la elaboración de equipos eléctricos y electrónicos (EEE) [10]. En los últimos años su producción pasó de 1.5 Mt en 1999 a 5 Mt en el 2020, dentro de la industria de EEE [11]. Además, PC es un termoplástico con propiedades atractivas a nivel industrial (óptica, transparencia, resistencia al fuego, durabilidad, dureza, entre otras) que lo hace fundamental en áreas como: construcción, transporte, óptica, empaçado y médica [12]. Sin embargo, su descomposición natural es una de las más lentas. Un CD compuesto en un 99% de policarbonato tarda cerca de 1000 años en degradarse completamente [13], por lo que un método para la disposición de este material es necesario.

Los tipos de reciclaje más estudiados para el PC han sido hidrólisis, glucólisis, hidroglicólisis, metanólisis, aminólisis y pirólisis [14]. Estas técnicas además de hacer frente a los problemas sociales, económicos y medioambientales que surgen en la incineración y depósito en vertederos; previenen la emisión del monómero del PC (bisfenol A), el que es conocido por ser perjudicial para la salud y el ambiente [7]. Sin embargo, el reciclaje químico implica el uso de solventes peligrosos, por lo que esta investigación se centrará en el reciclaje termoquímico, la pirólisis.

1.2.3. Revisiones literarias sobre la pirólisis del PC

La pirólisis del PC se ha estudiado desde hace 50 años [15], donde los investigadores han experimentado con diferentes condiciones de operación, tales como: temperatura, tipo de reactor, catalizadores; y co-procesamiento con biomasa y con otros polímeros. Sin embargo, esta información se encuentra dispersa, ya que no se han realizado revisiones enfocadas en el tema, que recopilen y comparen los resultados obtenidos.

En Scopus se encontraron 11 revisiones relacionados a la pirólisis del PC desde 1969 hasta la actualidad (octubre-2021). De estas solo 2 plantean el uso de la pirólisis como método de reciclaje, mientras que el resto la usan para reportar los estudios de microplástico en el ambiente o el comportamiento del PC con retardantes de flama. La primera de las revisiones de reciclaje termoquímico de PC registrada en Scopus y publicada en 2013 por Antonakou et al. describe los 3 tipos de reciclajes estudiados para el PC (mecánico, químico y termoquímico) [7]. De la misma forma, Pallab Das et al. en 2021 publicó una revisión en la que se analizan algunos métodos de reciclaje termoquímico como: hidrólisis, incineración y pirólisis; aplicados a los plásticos comúnmente usados para la fabricación de equipos electrónicos [16]. Como se puede evidenciar las revisiones no son específicas al tema de estudio y se trata de revisiones narrativas que hacen un recuento general de algunos métodos de reciclaje para algunos tipos de plásticos según su aplicación industrial.

1.3. Justificación de la Investigación

La disposición final de los plásticos en general y del PC en específico implica un problema medioambiental. El PC al ser un polímero con gran variedad de aplicaciones, principalmente para la industria de los EEE presenta un crecimiento acelerado, por lo que es necesario el desarrollo de métodos de reciclaje. Para estos métodos se debe tener en cuenta la alta toxicidad del bisfenol A y las condiciones de degradación del material.

La pirólisis es un método prometedor para el reciclaje del PC. Si bien esta tiene baja selectividad y produce una gran variedad de compuestos, es la de más sencilla implementación. De manera, que se deben definir las condiciones que permiten hacerla selectiva para la recuperación de los compuestos más usados a nivel industrial como el bisfenol A y fenoles.

A pesar que se ha estudiado la degradación y pirólisis del PC hace más de 50 años, casi no se encuentran revisiones que recopilen esta información. Pese a que en Scopus se encontraron 2 revisiones, estas no se enfocan en el tema de estudio, por lo que se necesita una revisión rigurosa sobre la pirólisis del PC enfocada en su funcionalidad como método de reciclaje químico.

1.4. Objetivos de la Investigación

1.4.1. Objetivo General

En este contexto se propone una revisión literaria híbrida sobre el desarrollo, aplicación y nuevas tendencias relacionadas a la pirólisis del policarbonato, de manera que resuma la información existente y determine las oportunidades de investigación.

Para ello se deberán cumplir los siguientes objetivos específicos:

- Presentar una visión general sobre el desarrollo histórico de la pirólisis del policarbonato mediante una revisión literaria narrativa.
- Comparar las condiciones de operación estudiadas en las investigaciones realizadas en los últimos 10 años por medio de una revisión literaria sistemática.
- Resaltar las tendencias emergentes en los últimos 10 años de la aplicación de la pirólisis de PC, tales como: uso de catalizadores, co-procesamiento y aplicaciones de los productos.

2. METODOLOGÍA

El reporte se escribió en inglés. Esto con base a que se espera que la investigación sea publicada y a que solo se procesarán artículos escritos en inglés para evitar el sesgo inherente de las traducciones.

Adicionalmente, en base a los objetivos se propuso una revisión literaria compuesta por 3 secciones: “*Historical and Theoretical Background on Polycarbonate Recycling*”, “*Study of Operational Conditions*” y “*New Trends*”. La primera consiste en una NRL, mientras que las dos últimas son SRLs. En consecuencia, la metodología de la primera sección difiere de las otras.

También, es importante mencionar que Scopus fue la base de datos usada para la exploración y selección de artículos de esta investigación. La rigurosidad académica y la publicación de artículos indexados fueron las razones para elegirla [17]. Además, se caracteriza por trabajar con las editoriales más importantes en materia de ciencias e ingeniería.

2.1. Metodología de “*Historical and Theoretical Background on Polycarbonate Recycling*”

En esta sección se realizó una revisión general de la evolución de las investigaciones referentes a la pirólisis del PC. Para ello se analizó con meta-análisis la frecuencia de las publicaciones por año. Después, se seleccionaron los artículos para describir el cambio de enfoque a través de los años desde el uso de la pirólisis para el estudio de la degradación del PC hasta su empleo como método de reciclaje químico.

Posteriormente, se decidió encaminar la revisión a los artículos orientados en la pirólisis del policarbonato como método de reciclaje en los últimos 20 años. Los puntos analizados fueron: año, país de publicación, y nuevas tendencias como co-pirólisis o pirólisis catalítica. Para el estudio de cada punto se estableció una entrada de búsqueda, se extrajo y organizó la información de los artículos en un diario científico. Los resultados fueron procesados por

medio de tablas de frecuencia y gráficos de barras, en formato de un meta-análisis. Finalmente, los gráficos fueron razonados en base a los artículos considerados más representativos en formato de una NRL.

2.2. Metodología de “*Study of Operational Conditions*” y “*New Trends*”

Las últimas dos secciones consistieron en una SRL basada en la técnica PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Esta metodología guía a los investigadores durante la selección de artículos. Tiene 4 etapas: identificación, selección, elegibilidad e inclusión de artículos [18]. Durante la etapa de identificación se realiza una búsqueda preliminar del tema general. En la selección se define el comando de entrada, tomando en cuenta la pregunta base de la revisión. En el caso de estas secciones se buscó responder a las preguntas ¿Cuáles han sido las condiciones operacionales en las que se ha investigado la pirólisis del PC? ¿Se ha estudiado la co-pirólisis del PC o la pirólisis catalítica, con qué compuestos? La tercera etapa consiste en una revisión manual de los artículos, aquí se determinan qué y por qué ciertas publicaciones son descartadas. Finalmente, se incluyen los artículos a la investigación, se extraen y procesan los datos de cada uno y los resultados se analizan para responder las preguntas planteadas.

Durante la etapa de identificación se realizó una búsqueda preliminar con los términos: *pyrolysis*, *polycarbonate*, y *poly(bisphenol A carbonate)*. Después, para la fase de selección, se revisaron los resultados anteriores y se fijó como comando de búsqueda: TITLE-ABS-KEY ("pyrolysis" AND ("polycarbonate" OR "poly(bisphenol A carbonate)")) AND NOT "mix?" AND NOT "blend?" AND NOT "plastic waste") AND NOT "retardant?" AND NOT "theor?". Esta entrada incluye los artículos relacionados con la pirólisis del PC, y excluye aquellos en los que: el PC no es una parte importante dentro de la alimentación y no se estudia la pirólisis del PC como método de reciclaje químico; es decir, se excluyen artículos en los que se usa la pirólisis para el estudio de retardantes de flama o simulaciones que estudian la degradación del

PC. También, se especifica el idioma de los artículos (inglés) y su año de publicación (2010 - 2021). En la Tabla 1 se muestra el número de artículos en base a los comandos de inclusión/exclusión. Se observa que de 388 artículos relacionados a la pirólisis del PC, solo 65 son considerados después de la etapa de elegibilidad.

Tabla 1. Número de artículos en base a los comandos de inclusión/exclusión

Operador Booleano	Palabra de búsqueda	Número de artículos
	Pyrolysis	133341
AND	Polycarbonate	386
OR	poly(bisphenol A carbonate)	388
AND NOT	blend?	314
AND NOT	retardant?	239
AND NOT	theo?	214
AND	Article	176
AND	2010-2021	72
AND	English	65

Fuente: [19]

Los estudios seleccionados durante la etapa de selección fueron procesados manualmente para determinar cuáles cumplen con los criterios de la investigación. Para la segunda sección, los artículos debían detallar la siguiente información para ser aceptados: descripción de los productos obtenidos y condiciones de operación (tipo de reactor, medio, método de análisis de resultados y temperatura de reacción). Para la tercera sección, además de la información anterior, debían detallar: qué catalizadores utilizaron (para pirólisis catalítica) y la composición de la alimentación (para co-pirólisis). La Tabla 2 muestra el número de artículos encontrados por etapa, en ella se observa que de 388 artículos relacionados con la pirólisis del PC, solo 16 fueron incluidos para la segunda sección y 11 para la tercera.

Tabla 2. Número de artículos incluidos en la revisión literaria por fase

Proceso	Observación	Número de artículos
Identificación	Title-ABS-KEY (“pyrolysis” AND (“polycarbonate” OR “poly(bisphenol A carbonate)”))	388
Selección	TITLE-ABS-KEY ("pyrolysis" AND ("polycarbonate" OR "poly(bisphenol A carbonate)") AND NOT "blend?" AND NOT "plastic waste" AND NOT "retardant?" AND NOT "theor?") Considerando estas restricciones: <i>Años:</i> 2010-2021 <i>Idioma:</i> Inglés <i>Tipo de documento:</i> Artículo	65
Artículos incluidos (Sección 2)	Después de la selección manual (elegibilidad)	16
Artículos incluidos (Sección 3)	Después de la selección manual (elegibilidad)	11

Fuente: [19]

Finalmente, los artículos incluidos fueron procesados en tablas de frecuencia y gráficos de barras para ser comparados y analizados.

Los artículos analizados en las Secciones 2 y 3 se detallan en Anexo B. Durante el análisis manual de cada artículo se observó que unos se enfocan en el estudio de la fracción sólida del producto y otros en la líquida, por lo que se decidió clasificar los artículos según su enfoque para la Sección 2. Adicionalmente, en el Anexo B se especifican qué artículos fueron analizados como estudios de co-pirólisis y pirólisis catalítica.

3. CONCLUSIONES

En conclusión, se ha determinado que el aumento del uso y por ende de la producción del PC, junto con su lenta y contaminante degradación, hacen necesario el desarrollo de métodos de reciclaje. La pirólisis es un método de fácil escalamiento a nivel industrial, por lo que ha sido estudiada en los últimos años; sin embargo, no se encuentran revisiones que guíen a los investigadores en el estado actual del arte y que destaquen la importancia de la pirólisis dentro del reciclaje químico.

En esta planificación se recalca la utilidad de una revisión literaria para ordenar y comparar la información dispersa. Adicionalmente, en este escrito se revisaron y compararon los tipos de revisiones según su metodología. Se encontró que las NRLs son útiles para revisiones generales y recuentos históricos, escritos que permiten entender la información disponible. Por otro lado, las SRLs son investigaciones enfocadas en aspectos puntuales; en este caso, determinar las condiciones de operación que optimizan el proceso, así como, identificar mejoras referentes a la co-pirólisis y la pirólisis catalítica. Por lo que para realizar un análisis completo se decidió elaborar una revisión híbrida.

En consecuencia, se propone un documento que ahonde en la cronología de lo que se ha realizado, qué y por qué algunos temas han tenido mayor repercusión entre los investigadores y en qué países se está estudiando. Además, el documento sintetizará y comparará la información relevante sobre las condiciones experimentales en las que se ha testado la pirólisis del PC, como: temperatura de operación, tipo de reactor, catalizadores usados, alimentación adicional (co-pirólisis), métodos de análisis de productos comúnmente obtenidos y productos esperados. De manera que se espera que el escrito sea una guía que ayude a comprender el estado del arte del tema y que sugiera nuevos campos de investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. Steward, "Writing a literature review," *Br. J. Occup. Ther.*, vol. 67, no. 11, pp. 495–500, 2004, doi: 10.1177/030802260406701105.
- [2] R. Ferrari, "Writing narrative style literature reviews," *Med. Writ.*, vol. 24, no. 4, pp. 230–235, Dec. 2015, doi: 10.1179/2047480615Z.000000000329.
- [3] J. D. Harris, C. E. Quatman, M. M. Manning, R. A. Siston, and D. C. Flanigan, "How to write a systematic review," *Am. J. Sports Med.*, vol. 42, no. 11, pp. 2761–2768, 2014, doi: 10.1177/0363546513497567.
- [4] R. Geyer, "Production, use, and fate of synthetic polymers," in *Plastic Waste and Recycling*, Elsevier, 2020, pp. 13–32.
- [5] M. Miranda, "Global evaluation of pyrolysis technologies for plastics and tyres waste treatment," *Proceedings of Energex*, no. 3-6 Mau, pp. 123–129, 2004, [Online]. Available: http://scholar.google.com/scholar?q=related:w7pIyUVIgmBMJ:scholar.google.com/&hl=en&num=30&as_sdt=0,5.
- [6] G. Gourmelon, "Global Plastic Production Rises, Recycling Lags," 2015.
- [7] E. V. Antonakou and D. S. Achilias, "Recent advances in polycarbonate recycling: A review of degradation methods and their mechanisms," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 4, no. 1, pp. 9–21, Mar. 05, 2013, doi: 10.1007/s12649-012-9159-x.
- [8] M. N. Siddiqui, H. H. Redhwi, E. V. Antonakou, and D. S. Achilias, "Pyrolysis mechanism and thermal degradation kinetics of poly(bisphenol A carbonate)-based polymers originating in waste electric and electronic equipment," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 132, pp. 123–133, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.JAAP.2018.03.008.
- [9] E. Apaydin-Varol, S. Polat, and A. E. Putun, "Pyrolysis kinetics and thermal decomposition behavior of polycarbonate - a TGA-FTIR study," *Therm. Sci.*, vol. 18, no. 3, pp. 833–842, 2014, doi: 10.2298/TSCI1403833A.
- [10] S. R. Chandrasekaran, S. Avasarala, D. Murali, N. Rajagopalan, and B. K. Sharma, "Materials and Energy Recovery from E-Waste Plastics," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 4594–4602, 2018, doi: 10.1021/acssuschemeng.7b03282.
- [11] E. Quaranta, A. Dibenedetto, F. Nocito, and P. Fini, "Chemical recycling of poly-(bisphenol A carbonate) by diaminolysis: A new carbon-saving synthetic entry into non-isocyanate polyureas (NIPUreas)," *J. Hazard. Mater.*, vol. 403, p. 123957, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123957.
- [12] M. N. Siddiqui, H. H. Redhwi, E. V. Antonakou, and D. S. Achilias, "Pyrolysis mechanism and thermal degradation kinetics of poly(bisphenol A carbonate)-based polymers originating in waste electric and electronic equipment," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 132, no. January 2018, pp. 123–133, 2018, doi: 10.1016/j.jaap.2018.03.008.
- [13] D. L, Z. W, X. L, C. X, L. A, and L. Z, "The preparation and degradation performance of CdS photocatalysts to methyl orange solution," *J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 13, no. 3, pp. 2242–2246, Mar. 2013, doi: 10.1166/JNN.2013.6905.
- [14] E. V. Antonakou and D. S. Achilias, "Recent advances in polycarbonate recycling: A review of degradation methods and their mechanisms," *Waste and Biomass*

- Valorization*, vol. 4, no. 1, pp. 9–21, Mar. 2013, doi: 10.1007/S12649-012-9159-X.
- [15] J. G. Kim, “Chemical recycling of poly(bisphenol A carbonate),” *Polym. Chem.*, vol. 11, no. 30, pp. 4830–4849, Aug. 2020, doi: 10.1039/c9py01927h.
- [16] P. Das, J. C. P. Gabriel, C. Y. Tay, and J. M. Lee, “Value-added products from thermochemical treatments of contaminated e-waste plastics,” *Chemosphere*, vol. 269. Elsevier Ltd, Apr. 01, 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129409.
- [17] “About Scopus - Abstract and citation database | Elsevier.” <https://www.elsevier.com/solutions/scopus> (accessed Nov. 14, 2021).
- [18] D. Moher, A. Liberati, J. Tetzlaff, and D. G. Altman, “Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement,” *J. Clin. Epidemiol.*, vol. 62, no. 10, pp. 1006–1012, Oct. 2009, doi: 10.1016/J.JCLINEPI.2009.06.005/ATTACHMENT/9CEC5A16-1AD7-41C0-8556-D3940D607979/MMC2.DOC.
- [19] K. Villarroel, “Pyrolysis of Polycarbonate: Literature Review,” *En proceso edición*, 2021.
- [20] C.-U. Pae, “Why Systematic Review rather than Narrative Review?,” *Psychiatry Investig.*, vol. 12, no. 3, p. 417, Jul. 2015, doi: 10.4306/PI.2015.12.3.417.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi mentora Daniela Almeida por darme la oportunidad de trabajar y aprender de ella. A mi familia por su complicidad, compañía y apoyo incondicional. A mi padre y hermano por su confianza, cuidado y por estar siempre presentes para mí. A mi hermana por su paciencia, guía y por ser mi ejemplo a seguir. Y a mi madre por ser la promotora de mis sueños, por medio de sus consejos, esfuerzo, amor y dedicación.

ANEXO A: TABLA COMPARATIVA NRL vs SRL

	Revisión Narrativa de la Literatura	Revisión Sistemática de la literatura
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none"> - Responde a varias preguntas - Permite generar debates generales de lo que se conoce - Es útil para determinar oportunidades de investigación y recuentos históricos - Sintetiza el conocimiento general 	<ul style="list-style-type: none"> - Identifica y analiza información relacionada a una pregunta enfocada - Útil cuando se necesita una investigación rigurosa que puede ser examinada por organizaciones externas
Limitaciones	<ul style="list-style-type: none"> - La metodología de selección y evaluación de artículos no siempre es clara - Se suelen responder a las preguntas de manera superficial - Está sujeta a sesgo - No es reproducible 	<ul style="list-style-type: none"> - Se pueden pasar por alto investigaciones, ya que el alcance depende de los criterios de búsqueda - Su calidad depende de una buena formulación de la pregunta principal
Diferencias clave	<ul style="list-style-type: none"> - Puede responder a varias preguntas - Puede no detallar los criterios de selección - Los artículos son escogidos por el investigador, por lo que están sujetos a sesgo - No son cuantitativos 	<ul style="list-style-type: none"> - Responde a una pregunta enfocada - Tiene criterios de selección y evaluación detallados - Se basa en guías de selección de información como: PRISMA (<i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses</i>) - Suelen ser cuantitativos

Fuente: [2], [20]

ANEXO B: ARTÍCULOS SELECCIONADOS PARA LAS SECCIONES 2 Y 3

Título del artículo	Año	Autores	Revista	DOI	ISSN	Keywords	Tema			
					Online		Interés en fracción sólida	Interés en fracción líquida	Co-pirólisis	Pirólisis catalítica
Direct conversion of ester bond-rich waste plastics into hard carbon for high-performance sodium storage	2021	Chen, D., Lou, K., Yang, Z., Zhong, Y., Wu, Z., Song, Y., Cheng, G., Wang, G. Zhing, B., Guo, X.	Carbon	10.1016/j.carbon.2020.11.004	0086223	Anode materials, Hard carbon, Sodium-ion batteries; Waste plastics	x			
Catalytic co-pyrolysis of polycarbonate and polyethylene/polypropylene mixtures: Promotion of oil deoxygenation and aromatic hydrocarbon formation	2021	Kai Sun, Wanli Wang, Nickolas J. Themelis, A.C. Thanos Bourtsalas, Qunxing Huang	Fuel	10.1016/j.fuel.2020.11.9143	00162361	Aromatic hydrocarbon, Co-pyrolysis, Deoxygenation, Polycarbonate, Polyethylene, Polypropylene		x	x	x
Consistent modelling of material weight loss and gas release due to pyrolysis and conducting benchmark tests of the model—A case for glovebox panel materials such as polymethyl methacrylate	2021	Ohno, T., Tashiro, S., Amano, Y., Yoshida, R., Abe, H.	PLoS ONE	10.1371/journal.pone.0245303	19326203	Fires; GC-MS; Gases; Polymers; Polymethyl Methacrylate; Polycarbonate; Pyrolysis		x		

Generation behavior of tar from ABS, PC, and PE during pyrolysis and steam gasification by mass spectrometry	2019	Numone, Y., Suzuki, T., Ndjalkov, I., Ueki, Y., Yoshiie, R., Naruse, I.	Journal of Material Cycles and Waste Management	10.1007/s10163-019-00883-9	14384957	ABS; Mass spectrometry; PC; Steam gasification; Tar		x	x	
Pyrolysis mechanism and thermal degradation kinetics of poly(bisphenol A carbonate)-based polymers originating in waste electric and electronic equipment	2018	Siddiqui, M., Redhwi, H., Antonakou, E., Achilia, D.	Journal of Analytical and Applied Pyrolysis	10.1016/j.jaap.2018.03.008	01652370	Polycarbonate; Pyrolysis; WEEE; Degradation; Kinetics		x		
Materials and Energy Recovery from E-Waste Plastics	2018	Chandrsekaran, S., Avasarala, S., Murli, D., Rajagopalan, N., Sharma, B.	ACS Sustainable Chemistry and Engineering	10.1021/acssuschemeng.7b03282	21680485	Polycarbonate; Polyamide; Solvent dissolution; Phase diagram; Pyrolysis		x	x	
Applied Problems of Selecting Synthetic Polymer Waste as Raw Material For Production of Active Carbon	2017	Irina, G., Yakov, V., Alezandr, S., Darya, D.	Nature Environment and Pollution Technology		09726268	Synthetic polymeric wastes; Thermal degradation; Carbonization; Activation; Active Carbon	x			
Pyrolysis of polycarbonate in coal-tar pitch	2016	Andreikov, E., Safarov, L., Pervova, M., Mekhaev, A.	Solid Fuel Chemistry	10.3103/S036152191601002X	03615219	Coal; Degradation; GC-MS; Liquid chromatography; Polycarbonates; Pyrolysis; Tar		x	x	
Utilization of waste discs via their thermal treatment in coal-tar pitch to obtain sorbents	2015	Andreikov, E., Safarov, L., Amosova, I.	Russian Journal of Applied Chemistry	10.1134/S1070427215060178	10704272	Sorbents, Coal-Tar Pitch, PC, CDs, DVDs, GC-MS		x	x	

Steam hydrolysis of poly(bisphenol a carbonate) in a fluidized bed reactor	2014	Guido Grause, Rikard Kärbrant, Tomohito Kameda, and Toshiaki Yoshioka	Industrial and Engineering Chemistry Research	10.1021/ie404263a	42154223	Magnesium oxide; Thermoresponsive polymers; Hydrolysis; Aromatic compounds; Pyrolysis		x		x
Co-pyrolysis of various lignins with polycarbonate	2014	Brebu, M., Nistor, M.	Cellulose Chemistry and Technology		05769787	Co-pyrolysis; Klason; Lignoboost; Organosolv; Polycarbonate		x	x	
Catalytic upgrading of co-pyrolysis oils from bisphenol A polycarbonate and lignins	2014	Brebu, M., Tamminen, T., Hannevold, L., Stöcker, M., Spiridon, I.	Polymer Degradation and Stability	10.1016/j.polymdegradstab.2014.01.035	01413910	Catalysts; Co-pyrolysis; Lignin; Polycarbonate; Upgrading		x	x	x
Catalytic and thermal pyrolysis of polycarbonate in a fixed-bed reactor: The effect of catalysts on products yields and composition	2014	E.V. Antonakou, K.G. Kalogiannis, S.D. Stefanidis, S.A. Karakoulia, K.S. Triantafyllidis, A.A. Lappas, D.S. Achilias	Polymer Degradation and Stability	10.1016/j.polymdegradstab.2014.10.007	01413910	Catalysts; Phenols; Polycarbonate; Pyrolysis; Zeolites		x		x
Pyrolysis kinetics and thermal decomposition behavior of polycarbonate - a TGA-FTIR study	2014	Apaydin.Varol, E, Sevgi Polat, Ayse Eren Putun	Thermal Science	10.2298/TSCII403833 A	03549836	Polycarbonate; Pyrolysis kinetics; TGA-FTIR; Thermal decomposition		x		

Preparation of activated carbons from polycarbonate with chemical activation using response surface methodology	2014	Li, Z., Wnag, K., Song, J., Xu, Q., Kobayashi, N.	Journal of Material Cycles and Waste Management	10.1007/s10163-013-0196-8	14384957	Activated carbon; Chemical activation; Polycarbonate; Water adsorptivity	x		x	
Co-pyrolysis of LignoBoost® lignin with synthetic polymers	2012	Mihai Brebu, Iuliana Spiridon	Polymer Degradation and Stability	10.1016/j.polymdegradstab.2012.08.024	01413910	Co-pyrolysis; LignoBoost® lignin; PC; PE; PP ; PS		x	x	