

Artículo de divulgación

Polímero Termoplástico: Polipropileno

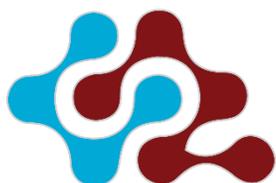
L. Blanco¹ , E. Catari^{1*} 

¹ Laboratorio de Polímeros, Centro de Química “Dr. Gabriel Chuchani”, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC), Apartado 21827, Caracas 1020-A, Venezuela.

Resumen

En los últimos años se han desarrollado innumerables investigaciones en torno al Polipropileno. El polipropileno (PP) es ampliamente utilizado en la industria en muchos campos de aplicación para la producción de plásticos moldeados debido a la excelente combinación de propiedades que presenta, como peso ligero, resistencia al impacto y relativo bajo costo. El gran uso de estos polímeros termoplásticos es motivo para buscar alternativas que impacten de manera positiva en su producción, costos de obtención y manufactura, mejores propiedades y que además tenga menor impacto en el medio ambiente. Este trabajo presenta una revisión general del polipropileno y sus aplicaciones, basándose principalmente en información publicada en la literatura, patentes y resúmenes de los procesos de fabricación de últimas tecnologías, con el objetivo de ampliar las perspectivas para su mejor investigación y estudios en el país.

Palabras clave: aplicaciones, polipropileno, polímero, propiedades, termoplásticos.



CIENCIA EN REVOLUCIÓN

Recibido: 23 de agosto del 2023

Aceptado: 10 de noviembre del 2023

Publicado: 8 de enero del 2023

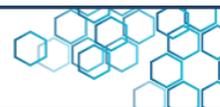
Conflicto de intereses: los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

DOI: 10.5281/zenodo.10492573

***Autor para correspondencia:**

Edgar Catari

e-mail: ecatari@gmail.com



Dissemination article

Thermoplastic Polymer: Polypropylene

L. Blanco¹ , E. Catari^{1*} 

¹ Laboratorio de Polímeros, Centro de Química “Dr. Gabriel Chuchani”, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC), Apartado 21827, Caracas 1020-A, Venezuela.

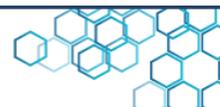
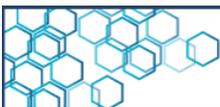
Abstract

In recent years, countless investigations have been carried out around Polypropylene. Polypropylene (PP) is widely used in industry in many fields of application for the production of molded plastics due to its excellent combination of properties, such as lightweight, impact resistance, and relatively low price. The great use of these thermoplastic polymers is the reason to look for alternatives that have a positive impact on their production, regarding the costs of obtaining and manufacturing, better properties, and that also have less impact on the environment. This paper presents a review of polypropylene technology and its applications, based mainly on information published in the literature, patents, and summaries of the history of manufacturing processes of the latest technologies, with the aim of opening perspectives for research and studies in the country.

Keywords: polypropylene, applications, properties, polymer, thermoplastics.



Received: August 23, 2023
Accepted: November 10, 2023
Published: January 8, 2023
Conflict of interest: the authors declare that there are no conflicts of interest.
DOI: 10.5281/zenodo.10492573
***Corresponding author:**
Edgar Catari
e-mail: ecatari@gmail.com



1. Introducción

El Polipropileno nació en Milano, Italia, el 11 de marzo de 1954. Al principio demostró características de poliedro, con rasgos de estereobloques isotácticos y sindiotácticos [1].

Ese año el italiano G. Natta, siguiendo los trabajos elaborados por K. Ziegler en Alemania, logró obtener polipropileno de estructura muy regular denominado isotáctico. Su comercialización en Europa y Norteamérica se inició rápidamente en 1957, en aplicaciones para enseres domésticos.

Los trabajos de Natta y Ziegler permitieron conseguir polímeros de etileno a partir de las olefinas, abriendo el camino para la obtención de otros polímeros. Este plástico, también con una estructura semicristalina, superaba en propiedades mecánicas al polietileno, su densidad era la más baja de todos los plásticos, así como, su precio, pero tenía una gran sensibilidad al frío, y a la luz ultravioleta, lo que le hacía envejecer rápidamente. Por este motivo su uso se vio reducido a aplicaciones muy específicas. Al pasar los años, esto ha cambiado y la amplia gama de propiedades del polipropileno, lo ha hecho adecuado para una gran variedad de aplicaciones en diferentes sectores, marcando la parada ante los materiales del futuro, además de suponer una alternativa mucho más económica. Debido a esto, el empleo de este material está creciendo, en gran parte gracias al desarrollo de nuevos y mejores productos.

El polipropileno (PP), es un polímero termoplástico comercial, semicristalino, blanco, semiopaco, que actualmente se elabora en una amplia variedad de calidades y modificaciones. Es un plástico

termoconformado que básicamente se utiliza para la construcción de piezas que necesitan resistencia química, peso ligero y fricción suave. Es un material muy rígido y duro, que tiene una excelente resistencia al impacto y a productos líquidos corrosivos. Es conocido como una poliolefina alifática que resiste al calor (160°C), tiene baja densidad y muy fácil moldeo. Fabricado en la industria es un polímero lineal. Actualmente, el PP es el tercer termoplástico más vendido y uno de los más baratos, ya que se puede sintetizar a partir de materiales petroquímicos de bajo costo [2]. Con el pasar de los años, los polímeros han logrado desplazar a los materiales metálicos y cerámicos, y es debido a todo esto, la causa de su gran demanda [3].

El PP es un plástico comercial típico y su producción mundial está en constante crecimiento, lo que se traduce en una búsqueda constante de mejoras del proceso de producción. Hoy en día, el PP se produce a gran escala ya que presenta una gran demanda global.

El polipropileno se prepara catalíticamente a partir de la Polimerización en cadena del propileno. Este es un polímero de vinilo en el que cada átomo de carbono está unido a un grupo metilo y se puede expresar como se muestra en la Figura 1, la cual es su unidad repetida [4].

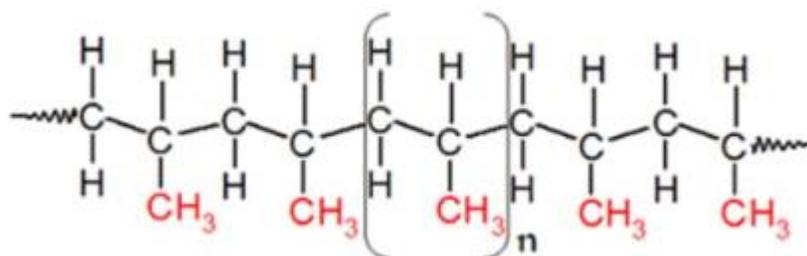
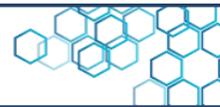


Figura 1. Estructura del polipropileno.



El PP tiene las características físicas de una gravedad específica baja, rigidez, resistencia al calor y trabajabilidad superior. Debido a su costo relativamente bajo, se utiliza en una gran variedad de aplicaciones tales como películas, componentes de vehículos, muebles y un sin fin de otros productos. Han pasado ya casi 70 años desde 1954 cuando Giorgio Natta *et al* de Italia lograron sintetizar PP altamente cristalino y de alto peso molecular [5].

El florecimiento del mercado de PP se ha respaldado por las grandes mejoras y simplificación del proceso de fabricación al pasar de los años, atribuido a un mejor rendimiento de los catalizadores utilizados, además de las características y propiedades propias del PP antes mencionadas. Cabe destacar, que a pesar de que el PP es ampliamente comercializado, se espera seguir potencializando y optimizando su amplio rango de aplicaciones [6].

En este artículo ofreceremos una visión general de todos los aspectos de dicho polímero, así como un resumen de las diferentes tecnologías que se aplican para su obtención.

2. Síntesis del polipropileno.

En este artículo ofreceremos una visión general de todos los aspectos de dicho polímero, así como, un resumen de las diferentes tecnologías que se aplican para su obtención.

Existen diferentes formas de unir los monómeros, pero el PP comercial se fabrica usualmente en presencia de un catalizador que da lugar a

productos semicristalinos con buenas propiedades físicas, térmicas y mecánicas [2].

El PP, es un producto petroquímico derivado del monómero olefínico propileno y se produce a través de un proceso de unión de monómeros llamado polimerización por adición del propileno (2-propeno), producto gaseoso obtenido a partir del proceso de refinado de petróleo. En este proceso, se somete el monómero a radiación de alta energía en condiciones de presión y temperatura controladas con un iniciador o catalizador para combinar los monómeros. Por lo tanto, las moléculas de propileno se polimerizan en moléculas o cadenas de polímeros muy largas. En el mismo orden de ideas, el propeno es un hidrocarburo saturado que únicamente contiene átomos de carbono y de hidrógeno.

En su reacción de polimerización, muchas moléculas de propileno (monómero) reaccionan para formar una gran molécula de polipropileno, tal como se muestra en la Figura 2.

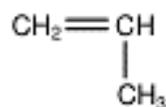


Figura 2. Molécula de propeno.

La síntesis de este polímero requiere un catalizador, que es generalmente un compuesto organometálico, donde el centro activo es un metal de transición. El catalizador actúa como soporte para que la reacción de polimerización tenga lugar, las moléculas de propeno se unen de forma secuencial a la cadena polimérica introduciéndose en la posición inicial entre el metal de transición y el enlace con la primera

unidad monomérica de la cadena polimérica. Uno de los átomos de carbono que forman el doble enlace de la molécula de propileno se inserta entre el catalizador metálico y el átomo de carbono de la cadena de polímero. Fruto de esta reacción de síntesis se obtiene una cadena lineal de carbonos con sustituyentes tipo metilo en posiciones determinadas. Miles de moléculas de propeno pueden unirse de forma secuencial antes de que se dé por finalizada la reacción de polimerización. En la Figura 3 se puede observar parte del proceso de polimerización de la estructura de la macromolécula de polipropileno.

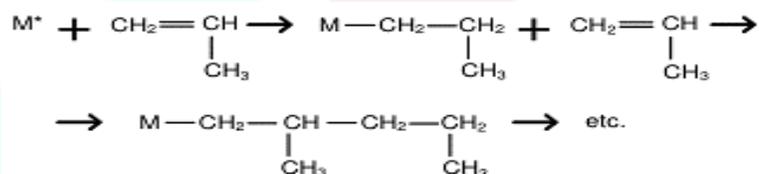


Figura 3. Mecanismo de polimerización del polipropileno.

La síntesis de polipropileno, bien sea mediante el empleo de catalizadores tipo Ziegler-Natta o bien metalocénicos, es una reacción altamente estereoespecífica. La orientación de las moléculas de propileno en la cadena polimérica depende de la estructura química y cristalina del catalizador, hecho que condiciona la estructura tridimensional resultante de la cadena polimérica. Las moléculas de propileno se unen a la cadena principal, incrementando la longitud de ésta, y no se unen a los grupos metilo ya que esto originaría una estructura ramificada que daría lugar a nuevas propiedades en el material. La unión entre las moléculas de propileno es, generalmente, del tipo cabeza-cola, como se muestra Figura 4, y no cola-cola o cabeza-cabeza, ver la Figura 5. La adición cabeza-cola, tiene como

resultado la obtención de una cadena de polipropileno donde los grupos metilo se hallan en posiciones alternadas mientras que en los otros tipos de adición se pierde esta regularidad.

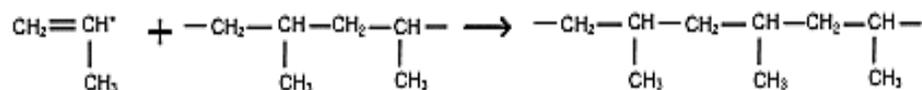


Figura 4. Adición cabeza-cola del propileno en la cadena principal.

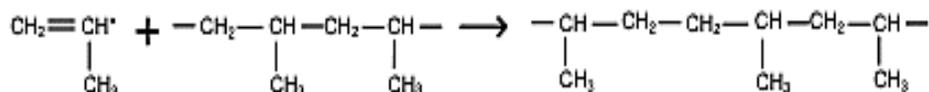
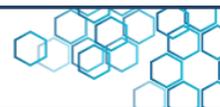


Figura 5. Adición cola-cola del propileno en la cadena principal.

Dependiendo las características del polímero obtenido tendrá aplicaciones específicas. Por ejemplo, cuando tienen lugar adiciones tipo cola-cola o cabeza-cola en la cadena principal, puede verse alterada la estructura cristalina de la molécula, hecho que hace disminuir el punto de fusión del polímero; formulaciones que son usadas por ejemplo en procesos de termo conformado o moldeo por soplado.

El proceso de fabricación del PP se compone básicamente de un proceso de refinación de materias primas, un proceso de polimerización, un proceso de postratamiento y uno de granulación. El proceso de purificación elimina del propileno cantidades diminutas de impurezas que afectan el proceso, como agua, oxígeno, monóxido y dióxido de carbono, sulfuro de carbonilo y similares, así como, los disolventes y otras materias primas y auxiliares utilizados, siendo este



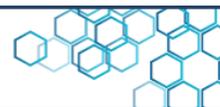
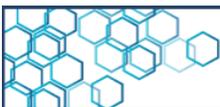
fundamentalmente necesario para la estabilización del proceso global. En el proceso de polimerización, se pone en contacto el propileno, y si es necesario, el etileno y otros monómeros con el catalizador que sirve de activador de la polimerización.

La mayoría de los principales catalizadores industriales se encuentran en forma granular como partículas secundarias o terciarias que son agregados de moléculas primarias. La reacción de polimerización ocurre en los puntos activos de las partículas del catalizador, el PP que se forma precipita y el catalizador se divide en partículas primarias. En estas reacciones, las partículas de PP que se forman se asemejan a la forma original del catalizador agregado [7].

El proceso de postratamiento es un proceso para eliminar los residuos de catalizador, el solvente y los polímeros atácticos no cristalinos donde los grupos metilos de las unidades de PP están dispuestos irregularmente en la cadena, los cuales son innecesarios en las partículas de PP obtenidas en la polimerización. Esta etapa del proceso de eliminación del catalizador se conoce como eliminación de cenizas.

Cuando se utiliza un disolvente en la depuración del proceso este debe no solo depurarse sino recuperarse. Por último, está el proceso de granulación, el cual consiste en fundir y amasar aditivos y rellenos en las partículas de PP.

En los últimos años se han generado mejoras a través del rendimiento del catalizador, métodos de distribución de estabilizadores, etc. con los cuales se puede controlar el proceso de polimerización obteniendo PP con características bien definidas simplificando las etapas del proceso en el postratamiento, representando avances significativos en los procesos de fabricación química. Hasta la fecha, el proceso de



obtención de PP se puede dividir en tres generaciones, la primera, eliminación de cenizas y de polímero atáctico (AP), la segunda, sin eliminación de cenizas ni solvente, y la tercera, sin eliminación de cenizas ni AP.

En la actualidad, existen diferentes métodos de polimerización de los PP: Polimerización en suspensión, polimerización en masa y polimerización en fase gaseosa [7].

2.1 Proceso en suspensión o “Slurry”

Este proceso es llamado así porque las partículas de PP se dispersan en forma de suspensión en el solvente (Proceso de polimerización por solvente) [7]. Esta reacción tiene lugar en un hidrocarburo líquido, en el que el PP es prácticamente insoluble a una temperatura inferior a la de fusión del polímero. Dentro de este tipo de procesos existen marcadas diferencias en la configuración de los reactores (de tipo bucle o autoclave) y en el tipo de diluyente utilizado, lo que afecta las características de la operación y al rango de productos que se puede fabricar. El más conocido es el proceso Montecatini, que gracias a los avances en materia de polimerización está prácticamente en desuso. El proceso se divide en varias etapas, tal como se muestra en la Figura 6, preparación del catalizador, polimerización, recuperación del monómero y solvente, remoción de residuos del catalizador, remoción del polímero atáctico y de bajo peso molecular, secado del producto, adición de modificadores y extracción del polímero.

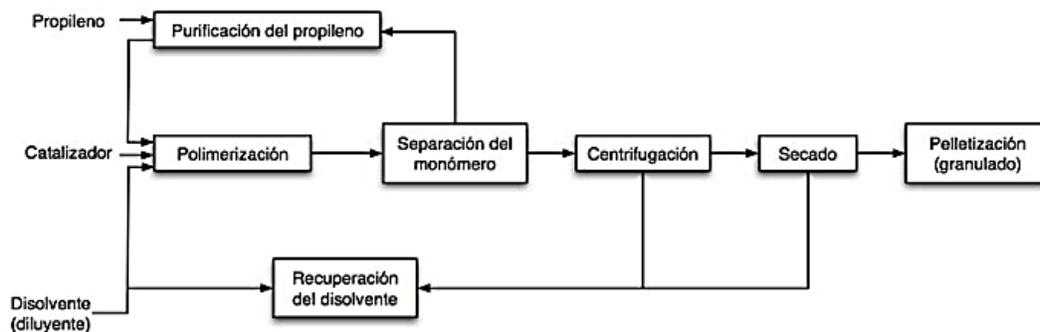


Figura 6. Diagrama de bloque del proceso en suspensión.

2.2 Proceso en masa con monómeros en fase líquida

La principal diferencia de este proceso con respecto al de suspensión es la sustitución del solvente por propileno líquido. Esto fue posible debido al desarrollo de nuevos catalizadores, y no fue más necesaria la extracción del catalizador ni la remoción del polímero atáctico. Se trata de un proceso versátil con menos etapas como se puede observar en la Figura 7.

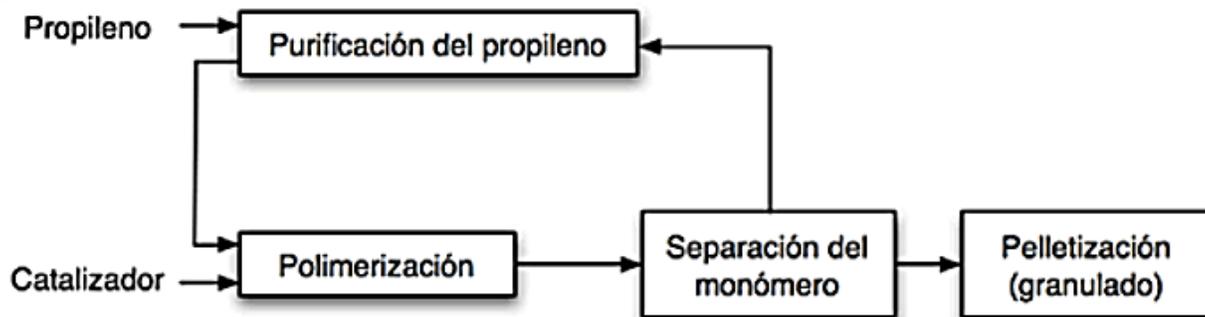


Figura 7. Diagrama de bloque del proceso con monómero en fase líquida.

El proceso más utilizado comercialmente corresponde a esta clasificación y es llamado Spheripol, el cual permite preparar diferentes tipos de productos con propiedades óptimas.

La Figura 8 muestra las etapas del proceso Spheripol, el cual es continuo y se basa en un catalizador superactivo ($Ti/MgCl_2$), un alquilaluminio, un donador de electrones.

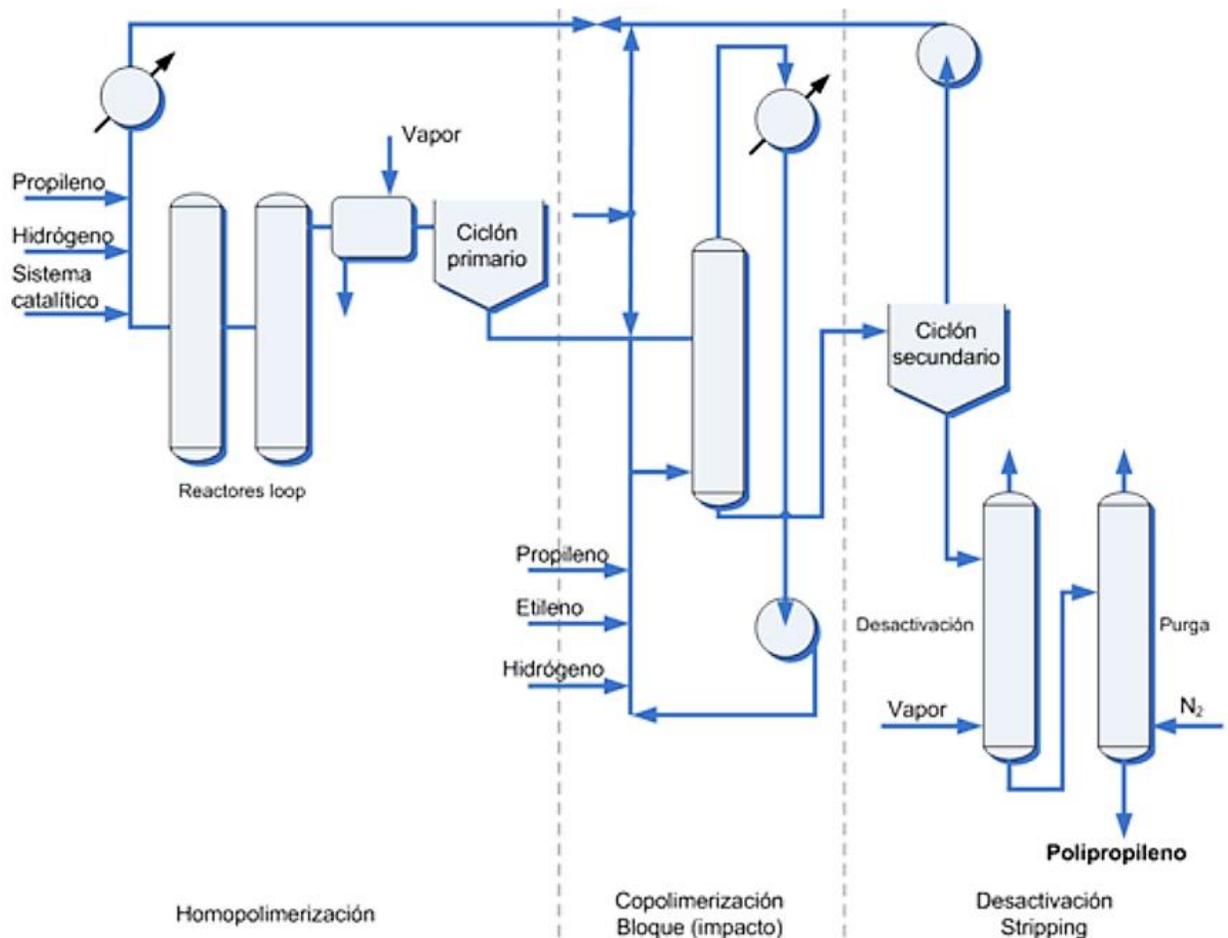
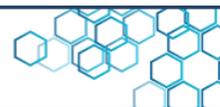
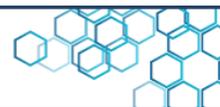


Figura 8. Diagrama de flujo del proceso Spheripol.



Existen dos reactores en serie: el primero para trabajar en masa y el segundo en fase gas. El primer reactor es de tipo bucle, donde se hace circular catalizador y monómero a gran velocidad para que permanezcan en suspensión en el diluyente. El diluyente es el propio propileno líquido, el cual facilita la evacuación del calor generado por la reacción y al mismo tiempo permite aumentar el rendimiento del sistema catalítico. En este reactor tipo bucle (loop) la mezcla reaccionante fluye impulsada por una bomba axial (no requiere agitación externa), y alcanza una alta velocidad que previene la deposición de polímero en las paredes del reactor; el área de transferencia de calor por unidad de volumen es más alta que en un reactor agitado, lo que permite un mejor control de la temperatura y mayor productividad. El tiempo de residencia en el reactor se puede alterar, variando la velocidad de recirculación. El propileno, que se puede diluir en propano (hasta el 40 %), alimenta al reactor en presencia de catalizador e hidrógeno. La temperatura de reacción es de entre 65 °C y 80 °C, y la presión de 33 atm. La mezcla de reacción circula rápidamente, y contiene hasta 50 % de sólidos. El Polímero y monómero no reaccionado se separan en un tanque flash a 16 atm. El monómero se recircula al reactor, y se remueve el propano sobrante. En el segundo reactor (de fase gas), se incorpora el polímero producido en el reactor tipo bucle. En esta fase se preparan copolímeros con características especiales añadiendo un comonómero (por ejemplo, etileno), además del monómero. A este reactor de lecho fluidizado ingresan las partículas de polímero y vapor de agua, con el fin de desactivar el catalizador. El secado se realiza con nitrógeno. El polímero se obtiene en forma de partículas esféricas con diámetro entre 1,5 y 2 mm y distribución de tamaño estrecha. La productividad es del orden de 20 kg/g catalizador



soportado (1000 Kg/g Ti). El índice de isotacticidad es de 97 %. El peso molecular se controla por adición de hidrógeno durante la reacción, y también utilizando compuestos organometálicos derivados de zinc o cadmio [8].

2.3 Proceso en masa con monómeros en fase gas

Los procesos en fase gaseosa aparecieron casi simultáneamente con los de fase líquida. Esta tecnología fue revolucionaria porque evitaba completamente la necesidad de un solvente o un medio líquido para dispersar los reactivos y productos del reactor. También, elimina la separación y recuperación de grandes cantidades de solventes o de propileno líquido, que era necesaria en los procesos con reactores en suspensión o en fase líquida. El polipropileno producto que se obtenía en los reactores de fase gas era esencialmente seco y sólo requería la desactivación de una pequeña parte de los residuos del catalizador antes de la incorporación de aditivos y su posterior peletización.

La Figura 9 representa un esquema general del proceso, el cual es parecido al de fase líquida, pero con menos etapas intermedias. Esta tecnología redujo la manufactura del polipropileno a pocos pasos esenciales. Algunos procesos muy populares representantes de esta tecnología son: Novolen, y Unipol [8].

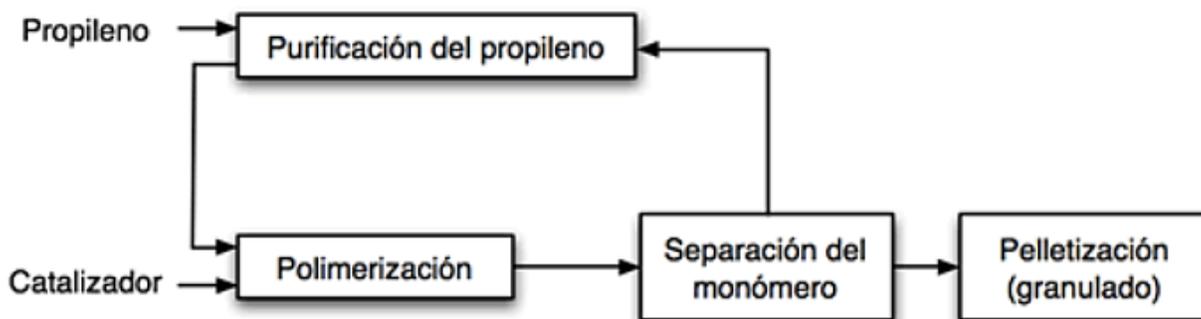


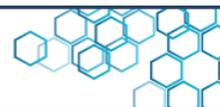
Figura 9. Diagrama de bloque del proceso en masa con monómero en fase gas.

3. Tipos de polipropilenos existentes

En general, los polímeros que consisten en monómeros idénticos se denominan homopolímeros, y los polímeros que están compuestos con más de un tipo de monómero en sus cadenas se conocen como copolímeros [4].

En los polipropilenos es importante acotar, como influye el grado de cristalinidad en las propiedades y los monómeros existentes en su matriz, razón principal e importante para su clasificación o tipos. Estas propiedades se pueden variar alterando el contenido y la distribución de la regularidad (tacticidad) de la cadena. Estas modificaciones se pueden lograr con la incorporación de un comonómero, como el etileno, en las cadenas poliméricas o la incorporación de un modificador de impacto en la formulación de la resina [2].

Existen tres tipos diferentes de polipropileno. Primero, un polipropileno que contiene solo monómero de propileno en una forma sólida semicristalina, homopolímero PP (HPP). En segundo lugar, el



polipropileno que contiene etileno como comonomero en las cadenas de PP en el rango de 1-8 %, copolímero aleatorio (RCP). Tercero, un HPP que contiene una fase RCP mezclada con contenido de etileno de 45 % a 65% llamado copolímero de impacto (ICP). Considerando la cristalinidad y matriz del PP, entra en juego el grado de tacticidad del polipropileno en la cual se subdividen los HPP. Entre los tipos de homopolímeros PP tenemos los polipropilenos isotácticos (iPP), sindiatáctico (sPP) y atáctico (aPP).

En otras palabras, el HPP consta de una sola unidad de propileno a lo largo de la cadena, con unidades de propileno en su mayoría isotácticas dando una estructura cristalina al polímero. Por lo tanto, el HPP exhibe un alto nivel de rigidez a temperatura ambiente y un alto punto de fusión, pero menor transparencia, así como, disminución de la fuerza de impacto.

3.1 Homopolímeros de polipropileno (HPP)

El homopolímero PP, es un sistema de dos fases porque contiene tanto cristalino como regiones lineales y no cristalinas. Las regiones no cristalinas o amorfas son compuestos tanto de PP isotáctico como de PP atáctico. El PP isotáctico en algunas regiones es cristalizable, y cristalizará lentamente con el tiempo hasta el límite que el enredo permita.

La estructura polimérica se denomina de diferentes formas en función de la orientación de los grupos metilo en la cadena principal; con base en esta consideración, se clasifican en polipropileno isotáctico,

sindiotáctico o atáctico como se muestra en la Figura 10. En esta, los grupos metilos están ubicados en diferentes zonas de la red cristalina.

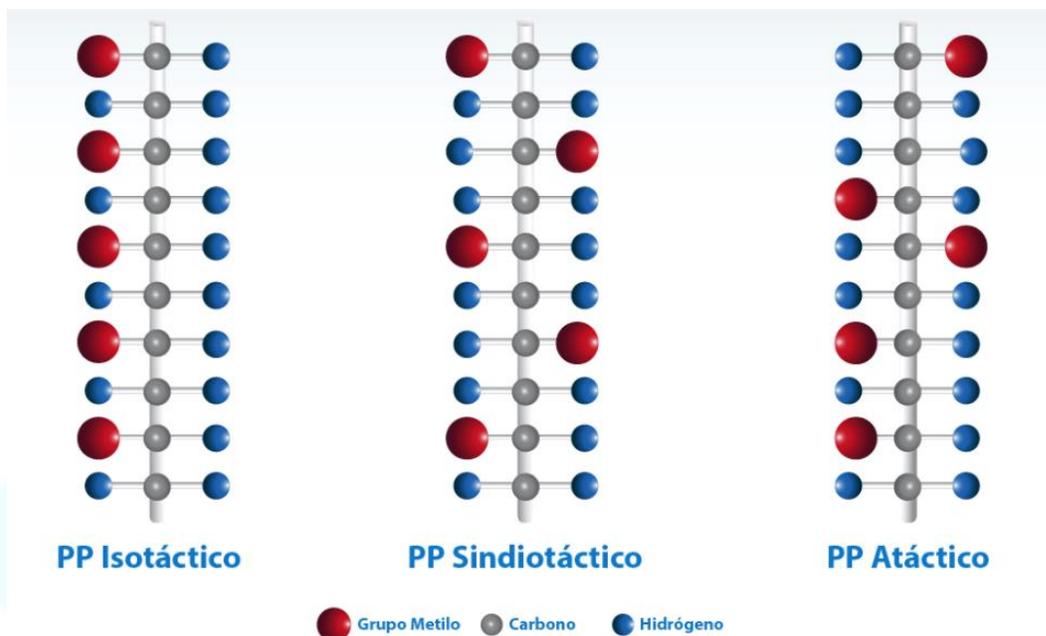
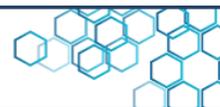


Figura 10. Tipo de tacticidad de los PP.

PP Isotáctico (iPP): El más utilizado, con moléculas que forman hélices, tiene una alta dureza y rigidez para fundir a los 1.760 °C. Tiene una alta cristalinidad (220.000 - 700.000 g/mol), y presenta un índice de fluidez entre 0,3–1.000 g/10min.

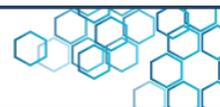
PP Sindiotáctico (sPP): Tiene los grupos metilo alternados a los lados de la cadena. Este no se produce comercialmente. Poco cristalino, lo cual lo hace ser más elástico que el polipropileno isotáctico, pero también menos resistente.



PP Atáctico (aPP): los grupos metilo se encuentran distribuidos en forma aleatoria a lo largo de la cadena de la macromolécula. Es amorfo y tiene pocas aplicaciones.

3.2 Copolímero aleatorio (Random)

Los copolímeros aleatorios (RCP), son copolímeros de etileno/propileno que se producen en un solo reactor mediante la copolimerización de propileno y pequeñas cantidades de etileno (generalmente 7 % o menos). El etileno interrumpe la estructura regular del polipropileno y da como resultado una reducción de uniformidad cristalina en el polímero. La relación entre el etileno y el espesor cristalino, es inversamente proporcional, lo que significa que a medida que el contenido de etileno aumenta, el espesor cristalino disminuye gradualmente, resultando en un punto de fusión más bajo. Estos copolímeros generalmente tienen propiedades de impacto ligeramente mejores que los HPP, disminución del punto de fusión y mayor flexibilidad. El etileno copolimerizado, cambia las propiedades del polímero. Con cadenas significativamente mayores, resulta en productos termoplásticos que se venden en mercados en los que las propiedades de impacto son ligeramente mejores, claridad mejorada, punto de fusión reducido o flexibilidad mejorada. El etileno monómero en la cadena de PP, se manifiesta como un defecto en la regularidad de la cadena, por lo que inhibe la cristalización de la cadena. La cantidad de etileno incorporada en la cadena suele ser dictada por el equilibrio entre las propiedades térmicas, ópticas y mecánicas.



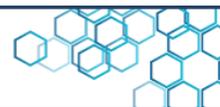
3.3 Copolímero de impacto

Los copolímeros de impacto (ICP), son mezclas físicas de HPP y RCP con un contenido total de etileno de aproximadamente entre 6 – 15 % en peso. Estos polímeros son óptimos a bajas temperaturas con una mayor resistencia al impacto. La parte RCP de la mezcla es diseñada para tener contenidos de etileno en el orden de entre 40 – 65 % y se denomina fase de caucho. El parecido a la goma mejora en gran medida la resistencia al impacto, particularmente a bajas temperaturas (por debajo de -20°C). Sin embargo, la rigidez es reducida resultando en un excelente equilibrio rigidez/impacto. Los productos de ICP, así como, la resistencia al impacto varía con respecto al tamaño, forma y distribución de las partículas de caucho.

En cuanto a ventajas y desventajas de los dos grandes grupos de PP, se presentan en la Tabla 1, que ilustra las diversas debilidades y fortalezas de ambos materiales, siendo el CPP el de mejores prestaciones y características, como lo son su procesabilidad, resistencia al impacto y la rigidez.

Tabla 1. Ventajas y desventajas del PP [4].

Ventajas del PP		Desventajas del PP
HPP	CPP	Degradación por UV
Buena procesabilidad	Alta procesabilidad	Flamable
Buena resistencia al impacto	Alta resistencia al impacto	Ataque por solventes aromáticos y clorados
Buena rigidez	Alta rigidez	Difícil de mezclar
Contacto con comida aceptable	Contacto con comida Preferiblemente no.	Degradación oxidativa severa por metales
		Resistencia al impacto a bajas temperaturas pobre



4. Propiedades del polipropileno

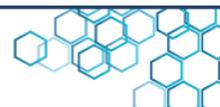
4.1 Propiedades fisicoquímicas

En general el PP puede considerarse químicamente inerte dada su estructura estable, lo que le otorga buenas propiedades de resistencia química. La Tabla 2 muestra algunas propiedades físicas del PP [9].

Tabla 2. Propiedades físicas de los PP.

Propiedades físicas	Valores típicos
Ganancia de humedad	< 0,1 %
Índice de refracción n_D	1,49
Conductividad térmica (20 °C)	0,14-0,22 W.m/°K
Coefficiente lineal de expansión térmica (20-60 °C)	100 10^{-6} °C ⁻¹
Calor de fusión (Entalpía)	21 cal/gr
Calor específico	0,46 cal/gr.°C
Densidad del fundido a 180 °C	0,769 gr/cc
Calor de combustión	10.725 Kcal/Kg
Índice de oxígeno	17,4
Rango de temperatura de descomposición	328 – 410 °C
Constante dieléctrica (20-80°C)	2,25 kHz
Factor de disipación ($10^2 - 10^6$ Hz)	< 0,0002 %
Resistividad volumétrica específica	> 10^{16} Ω .cm

Entre estas propiedades tenemos, la absorción de humedad la cual es la capacidad de absorción de agua, que influye mucho en su procesamiento como en sus propiedades y apariencia estética, los PP presentan un porcentaje de ganancia de humedad muy bajo (< 0,1 %); su índice de refracción es de 1,49 el cual es un valor típico de polímeros termoplásticos orgánicos. La conductividad térmica (K) es una medida de qué tan bien un material transfiere calor. Los PP presentan una amplia variedad en la K ya que la misma depende del grado de cristalinidad; un polímero con un alto grado de cristalinidad y una

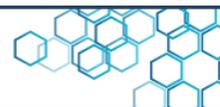


estructura ordenada tendrá una conductividad mayor que el material amorfo equivalente. Esto se debe a la vibración coordinada más efectiva de las cadenas de moléculas en el estado cristalino.

La entalpía de fusión o calor de fusión ($\Delta_{fus}H$), es la cantidad de energía necesaria para hacer que un mol de un elemento alcance su punto de fusión y pase del estado sólido al líquido, a presión constante. En otras palabras, es la cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno. El PP presenta un $\Delta_{fus}H$ de 21 cal/gr. La densidad del PP es baja (0,769 gr/cc). El índice de oxígeno limitante (LOI), o índice de oxígeno (límite) (IO (L) o (L) OI [índice de oxígeno (límite)]), es utilizada para caracterizar la combustibilidad (inflamabilidad) de un material combustible, en particular un plástico. Para el PP la combustibilidad es muy alta (17,4). Estas propiedades, junto con su resistencia al agua, baja densidad y buena relación precio/propiedades otorgan al PP gran importancia a nivel industrial [9].

En el mismo orden de ideas, la Tabla 3 muestra algunas propiedades del polipropileno isotáctico [10]. El iPP es semirrígido, translúcido, con buena tenacidad, resistencia al calor y a productos químicos. Además, tiene alto reblandecimiento o punto de transición vítrea, baja absorción de agua, buena resistencia eléctrica, estabilidad dimensional, y no es tóxico.

Tabla 3. Propiedades del iPP.

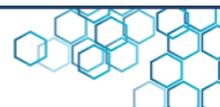
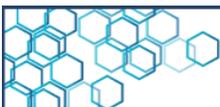


Propiedad	Valor
Densidad (g/cm ³)	0,91-0,94
Resistencia a la tracción (Psi)	3.200-5.000
Absorción de agua 24h (%)	0.01
Elongación (%)	3-700
Punto de reblandecimiento T _g (°C)	140-150
Punto de fusión T _m (°C)	160-166
Expansión térmica 10 -5 pulg/pulg (°C)	5,8-10
Volumen específico (cm ³ /lb)	30,4-30,8

4.2 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas del polipropileno varían drásticamente en función del grado de cristalinidad. Un aumento de la cristalinidad en el material se traduce en un incremento en la rigidez, en la resistencia a la flexión, pero hace disminuir ciertas propiedades como la dureza y la resistencia a impacto [9].

En la Tabla 4 se puede observar algunas propiedades mecánicas de diferentes tipos de PP [4]. Los homopolímeros PP isotácticos (iPP), son los que presentan mejores propiedades mecánicas en líneas generales. Mayor índice de fluidez, resistencia a la tracción, módulo de flexión, elongación y dureza ligeramente superiores a los demás homopolímeros PP y copolímeros PP. Con el aumento de la cristalinidad existe un mejor reordenamiento de las cadenas poliméricas, que se traduce a mejores propiedades del polímero (características del iPP). Los homopolímeros con presencia de zonas amorfas como el sPP y aPP, presentan rangos de valores menores en comparación con el iPP. Los CPP, muestran diferencias entre sí en algunas propiedades en



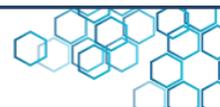
específico. La dureza y resistencia a la tracción se evidencia más alta en los copolímeros de impacto a diferencia de los otros PP [11].

Tabla 4. Propiedades mecánicas de los PP.

Propiedad	Homopolímero PP			Copolímero PP	
	iPP	sPP	aPP	ICP	RCP
Índice de fluidez	3	0,7	0,2	3	0,2
Resistencia a la tracción (MPa)	34	30	29	29	25
Elongación a la fractura (%)	350	115	175	40	240
Módulo de flexión (MPa)	1.310	1.170	1.100	1.290	1.030
Temperatura de fragilidad (°C)	15	0	0	-15	-20
Punto de reblandamiento Vicat (°C)	154 -150	148	148	148	147
Dureza Rockwell (Escala R)	95	90	90	95	88,5
Resistencia al impacto (ft.lb)	10	25	34	34	42,5

Los grados comerciales están disponibles en variedad de distribución de peso molecular y tipos de comonomero, así como, con sus contenidos y aditivos. Con mejores propiedades físicas el PP puede tener aplicaciones más exigentes como películas, fibras, cintas, láminas, termoformado, inyecciones y moldeo por soplado. Algunas comparaciones de propiedades mecánicas y térmicas de los polipropilenos comerciales como conductividad térmica se muestran en la Tabla 3 y 4, respectivamente [12, 11].

Las propiedades de varios grados de homopolímero se muestran en la Tabla 5. En esta tabla, el peso molecular del polímero y la polidispersidad se adaptan para dar las mejores características de



procesamiento para cada proceso de fabricación. Los polímeros que se muestran en la Tabla 5, se produce por polimerización directa. Mayores grados de flujo de fusión, y los grados de “reología controlada” con polidispersidad estrecha, pueden ser importantes en otras aplicaciones, incluidas las fibras. Las resinas de polidispersidad estrecha, también se pueden producir por catalizadores de metalloceno [13]. Estos catalizadores también pueden producir iPP con una estrecha distribución de tacticidad entre cadenas. Los grados de alta cristalinidad (tacticidad) y los grados de alta polidispersidad proporcionan rigidez adicional y mayor temperatura de distorsión térmica en solicitudes de moldeo por inyección [14].

Tabla 5. Propiedades de homopolímeros PP de diferentes grados [15]

Índice de fluidez (g/10min)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Elongación a la fluencia (%)	Módulo de flexión 1% secante (Mpa)	Temperatura de deflexión 455KPa, (°C)	Impacto Izod a 23°C (J/m)	Dureza Rockwell R	Productos / Aplicación
0.5	33	13	1.200	96	81	86	Extrusión, perfiles
4	34	12	1.400	93	39	86	Moldeo por inyección, fines generales
12	34	10	1.400	92	35	88	Moldeo por inyección, fines generales
22	36	10	1.500	93	34	93	Moldeo por inyección, fines generales, pared delgada
35	32	12	1.200	95	32	89	Moldeo por inyección de reología controlada.

En la Tabla 6, se muestran las propiedades de algunos copolímeros aleatorios. Estos copolímeros tienen etileno, aunque también es posible buteno. La rigidez de estos polímeros es menor que la de los homopolímeros. En estos se mejora la resistencia al impacto, particularmente a temperaturas de refrigeración. La claridad también se mejora. Su bajo punto de fusión permite su uso como capas selladoras en películas de polipropileno.

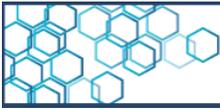


Tabla 6. Propiedades de copolímeros aleatorios (random) de etileno [15].

Índice de fluidez (g/10min)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Elongación a la fluencia (%)	Módulo de flexión 1% secante (Mpa)	Temperatura de deflexión 455KPa, (°C)	Impacto Izod a 23°C (J/m)	Productos / Aplicación
2	28	13	940	79	330	Moldeo por soplado de alta calidad, extrusión, termoconformado
6,5	28	13	920	76	56	Película fundida de alta calidad
11	30	13	1.000	84	66	Moldeo por inyección de alta calidad, moldeo por inyección soplado
35	28	13	940	83	140	Moldeo por inyección de reología controlada

En la Tabla 7, se dan las propiedades de los copolímeros resistentes al impacto. Gran parte de esta clase de material se utiliza en aplicaciones de moldeo por inyección, proporcionando resistencia al impacto muy por debajo de 0°C. Son Copolímeros que contienen alta flexibilidad en sus productos. Además, se utilizan cargas minerales, ya que es uno de los plásticos más duros, resistentes al calor y al agua, el cual posee características que lo diferencian de entre otros materiales. Este material es utilizado para crear objetos de todo tipo, debido a que sus componentes lo hacen flexible al ser usados.

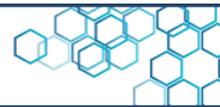
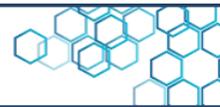
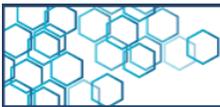


Tabla 7. Propiedades de copolímeros de impacto de etileno [15].

Índice de fluidez (g/10min)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Elongación a la fluencia (%)	Módulo de flexión 1% secante (Mpa)	Temperatura de deflexión 455KPa, (°C)	Impacto Izod a 23°C (J/m)	Productos / Aplicación
0.45	27	11	1.100	88	No falla	extrusión
2	27	9	1.200	90	270	Moldeo por inyección de impacto medio
4	27	8	1.200	90	110	Moldeo por inyección de impacto medio
35	27	6	1.400	100	70	Moldeo por inyección con flujo alto y paredes delgadas de impacto medio
50	26	6	1.200	107	42	Moldeo por inyección con flujo alto y paredes delgadas de impacto medio
4	21	8	1.000	81	No falla	Extrusión y Moldeo por inyección de impacto medio
8	26	8	1.200	87	100	
22	24	7	1.000	83	100	Moldeo por Inyección de reología controlada moldeo de impacto medio
12	22	8	900	82	340	Moldeo por inyección con resistencia alto impacto

5. Aplicaciones del polipropileno

El PP posee características que lo diferencian de otros materiales. A partir de los procesos industriales se pueden preparar un sin fin de productos diferentes, cuyas propiedades varían según la longitud de las cadenas del polímero (peso molecular), de su polidispersidad y de



comonómeros eventualmente incorporados [9]. Las aplicaciones del PP son ilimitadas e incluyen flejes, películas, láminas, moldeo por inyección y soplado, películas, telas no tejidas y monofilamentos, así como, diferentes tipos de fibras o tejidos. El PP es un material central en muchos plásticos modificados para mejorar sus propiedades. Ideales para utilizarlos como condensadores de película delgada en aplicaciones eléctricas para almacenar energía. Empaques rígidos y artículos para el hogar, son algunas aplicaciones del moldeo por inyección. Las botellas y los tarros son los principales productos de la técnica de moldeo por soplado [4].

El PP tiene muchas otras aplicaciones asociadas con plásticos en herramientas médicas o de laboratorio, tinas de plástico, envases de plástico, papeleras, receta de farmacia, botellas, recipientes enfriadores, platos, jarras, alfombras, aislamiento para cables eléctricos, carpetas de papelería, cajas de almacenamiento, pantallas de luz, unidades de control de altavoces y filtros de agua o aire acondicionado. Además, se utiliza para producir ropa o incluso productos relacionados con la ropa, como pañales o productos sanitarios donde el PP es tratado para absorber agua (hidrofílico), en lugar de repeler el agua de forma natural (hidrofóbico). El PP es perfecto para la fabricación de base de ropa interior de capas para el frío. Otras aplicaciones interesantes del PP son las espumas de lámina de PP. La Tabla 8 muestra cómo se utiliza en diferentes áreas, como la automotriz, hogar, electrónica y en construcción [4].

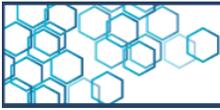


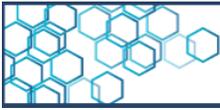
Tabla 8. Aplicaciones de láminas de espuma de PP [4].

Transporte	Productos de plástico moldeado por inyección; automotor, piezas y accesorios aeroespaciales y náuticos; vaso y espejos
Muebles	Mobiliario residencial y de oficina de madera; metálico, cerámico y herrajes de vidrio; espejos; armarios de madera
Electrónica	Ordenadores; televisores; sistemas de audio; radios; componentes y partes
Construcción	mantas de curado de hormigón; aluminio extruido productos; herrajes funcionales y decorativos; protección para tuberías enterradas

5.1 Fibras y tejidos

Las fibras se producen mediante de procesos de extrusión. Las fibras incluyen películas o cintas cortadas. Las ventajas que ofrece el PP incluyen un bajo peso específico, que significa mayor volumen por peso dado. Existen diferentes aplicaciones para fibras, como película cortada, fibras cortadas, textiles no tejidas y monofilamentos. La película cortada, es una banda ancha extruida. Su principal aplicación es en los respaldos de alfombras. Hoy en día, los respaldos de alfombras se fabrican a partir de PP naturales de yute. La razón es que las fibras de yute se dañan más rápido que las fibras de PP en climas de alta humedad. Las aplicaciones de película cortada son: cordeles, tejidos para sacos de fertilizantes, sacos de arena y a granel, bolsas de contenedores, lonas, esteras, pantallas para la erosión prevención y geotextiles para estabilizar lechos de suelo [2].

5.2 Películas

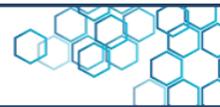
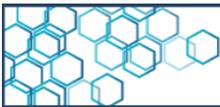


Por proceso de extrusión de PP se producen películas con espesores menores de 10 milésimas de pulgadas. Estas se utilizan en productos alimenticios, tabaco y ropa. Hay dos clases de películas: fundidas y orientadas [2]. Las películas orientadas son fabricadas depositando una capa de plástico líquido sobre una superficie y estabilizando esta forma al permitir que la masa fundida se enfríe por evaporación del disolvente. El espesor de la película suele estar entre 1-4 milésimas de pulgada. Una característica importante de las películas fundidas es que son blandas. Tanto los homopolímeros como los copolímeros aleatorios, son utilizados en películas de reparto. Las películas fundidas se convierten en productos como bolsas, páginas, protectores de hojas, cintas y etiquetas autoadhesivas [2].

5.3 Termoformado

Implica calefacción de la lámina termoplástica hasta su punto de reblandecimiento seguido de formación de la hoja ablandada en una forma deseada por medios mecánicos y finalmente la solidificación en la forma deseada. El proceso de extrusión produce una hoja que es mayor de 10 milésimas de pulgada de espesor y el espesor típico es de aproximadamente 40 milésimas de pulgada. El ancho de la hoja suele ser de 2 a 7 pies. Se utilizan hojas en la producción de envases termoformados para aplicaciones de embalajes rígidos.

5.4 Moldeo por inyección.



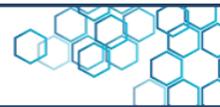
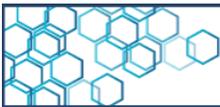
Estos artículos están hechos de homopolímeros, copolímeros de impacto y aleatorios, y de una variedad de polímeros rellenos, utilizando máquinas de inyección convencionales. Este consiste en la fusión del material, junto con colorantes o aditivos, para luego forzarlo bajo presión dentro de un molde. Este molde es refrigerado, el material se solidifica y el artículo final es extraído. Este método es usado para hacer muchos tipos de artículos, como frascos, tapas, muebles plásticos, sillas, cuerpos de electrodomésticos, juguetes, aparatos domésticos y piezas de automóviles [8].

5.5. Moldeo por soplado.

Es usado para la producción de frascos, botellas, bidones, toboganes, tanques, tanques de vehículos, etc. En este proceso, un tubo de material fundido es soplado dentro de un molde y toma la forma de la cavidad. Cuando es enfriado, el molde es abierto y el artículo extraído.

5.6. Industria automotriz.

El PP tiene una gran presencia en los vehículos. Para ejemplo, uno de sus usos es en cajas de batería dado que el PP se considera el termoplástico más ligero debido a su baja densidad (0,9 g/mL), gran parte de los plásticos en autos nuevos son PP porque las compañías automotrices tienden a reducir el total peso de sus coches para ahorrar gastos en consumo de gasolina. Además, se fabrican molduras interiores y varios componentes exteriores, acabados interiores como puertas, los pilares, los paneles laterales y las consolas. Un material especial conocido que se produce a partir de PP llamado La olefina



termoplástica (TPO), se utiliza en los parachoques de los automóviles. El TPO También se utiliza en revestimientos laterales de carrocería, paneles de balancines e incluso parrillas [4].

6. Producción industrial del polipropileno

6.1 Principales empresas productoras nacionales

Propilven:

Es una empresa venezolana de capital mixto, productora de polipropileno grados homopolímeros, copolímeros random e impacto, ver Figura 11. La empresa fue constituida en 1985, con su planta ubicada en el Complejo Petroquímico Zulia "Ana María Campos", en la costa nororiental del Lago de Maracaibo, al noroeste de Venezuela. La capacidad instalada de Propilven a principio de la década de 1990 fue de 70.000 toneladas; para 1996 se incrementó a 84.000 toneladas métricas por año. Llegó A 110.000 en el año 2004. Con el plan de expansión lograron un incremento de 34.000 toneladas más [8]. En el año 2022, Khalil Nasser, miembro y expresidente de la Cámara Venezolana de la Industria del Plástico, aseguró que, la empresa productora de plástico produjo alrededor de 20.000 toneladas la cual representa un 15% de su capacidad instalada.

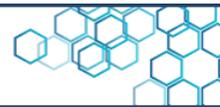
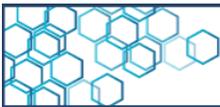


Figura 11. Logo de Polipropileno de Venezuela S.A (PROPILVEN)

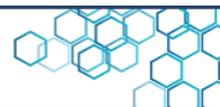
6.2. Principales empresas productoras a nivel mundial

El tamaño del mercado de polipropileno se estimó en más de 80 millones de toneladas en 2021, y se prevé que el mercado registre una CAGR del 5,2 % durante el período de pronóstico (2022-2027).

Asia Pacífico fue la región más grande en el mercado de polipropileno en el año 2021. América del Norte fue la segunda región más grande en el mercado de polipropileno. Las regiones son Asia-Pacífico, Europa Occidental, Europa del Este, América del Norte, América del Sur, Oriente Medio y África. Las empresas más importantes y mencionadas a nivel mundial son: Lyondellbasell, Borealis, Braskem, China Petrochemical Corporation y Reliance Industries Limited, entre otras.

7. Conclusiones

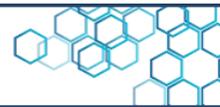
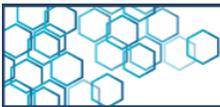
El polipropileno es un polímero que surge de la polimerización de propileno. Siendo la segunda poliolefina más utilizada a nivel mundial



luego del PE. Existen 3 clasificaciones de procesos para polimerizar al propileno, siendo la fase gaseosa la más eficaz, aunque el proceso en masa con monómero en fase líquida y fase gas, son los más utilizados actualmente, y no necesitan de un disolvente adicional a diferencia del proceso en suspensión. Los mecanismos de reacción de Z-N contemplan una iniciación (activación del catalizador), propagación (crecimiento de la cadena) y terminación (transferencia de cadena y descomposición del catalizador). El proceso Spheripol, es el proceso en masa más utilizado comercialmente, por las mejoras que ofrece ante el proceso de suspensión. En Venezuela, solo existe la empresa Propilven, la cual polimeriza y comercializa el PP a empresas nacionales que están encargadas únicamente de su transformación. El polipropileno es un polímero con una variedad muy amplia de aplicaciones, las cuales con el desarrollo tecnológico de la actualidad seguirá ampliándose mucho más debido a sus excelentes propiedades.

8. Referencias bibliográficas

- [1]. Busico V, Cipullo R. Microstructure of polypropylene. Prog Polym Sci [Internet]. 2001;26(3):443-533. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0079-6700\(00\)00046-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0079-6700(00)00046-0)
- [2]. Karian HG. Handbook of polypropylene and polypropylene composites, revised and expanded. 2a ed. Boca Ratón, FL, Estados Unidos de América: CRC Press; 2003.
- [3]. Brenner E. Polypropylene ± an Alternative? Window Profile Material in PP Compound, 2004.
- [4]. Maddah HA. Polypropylene as a Promising Plastic: A Review. American Journal of Polymer Science. 2016;6(1):1-11.



- [5]. Natta G, Pino P, Corradini P, Danusso F, Mantica E, Mazzanti G y Moraglio G. Crystalline high polymers of α -olefins. 1955. Journal of the American Chemical Society, 77(6), 1708-1710.
- [6]. Caicedo-Cano C, Servicio Nacional de Aprendizaje - Centro de Asistencia Técnica a la Industria, Crespo-Delgado LM, de la Cruz-Rodríguez H, Álvarez-Jaramillo NÁ, Servicio Nacional de Aprendizaje - Centro de Asistencia Técnica a la Industria, et al. Propiedades termomecánicas del Polipropileno: Efectos durante el reprocesamiento. Ing Investig Tecnol. 2017;18 (3): 345-52. DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/fi.25940732e.2017.18n3.022>
- [7]. Hideki S, Hiroyuki O. Review on Development of Polypropylene Manufacturing Process. Sumitomo Chemical Co, Ltd Process & Production Technology Center. 2009; II.
- [8]. López A, Caleffi C, Dominguez. N. proceso-de-polipropileno. 2016 Jun.
- [9]. Monzo M. Investigación de la influencia del tipo de gas utilizado en el plasma atmosférico, en la modificación superficial del polipropileno. 2015.
- [10]. Shubhra QTH, Alam AKMM, Quaiyyum MA. Mechanical properties of polypropylene composites: A review. Vol. 26, Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2013. p. 362-91.
- [11]. Brydson TJA. Brydson's Plastics Materials. Brydson's Plastics Materials. 2017.
- [12]. Andrady AL, Neal MA. Applications and societal benefits of plastics. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 2009 Jul 27;364(1526):1977-84.
- [13]. Brintzinger HH, Fischer D, Miilhaupt R, Rieger B, Waymouth RM. Stereospecific Olefin Polymerization with Chiral Metallocene Catalysts.
- [14]. Supaphol P, Spruiell JE. Regime crystallization in syndiotactic polypropylenes: re-evaluation of the literature data.
- [15]. Lieberman RB, Barbe PC. PROPYLENE POLYMERS. Encyclopedia of Polymer Science and Technology. 2004. p 287-298.