

PROYECTO FINAL DE GRADO - INGENIERÍA EN MATERIALES

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE RECICLADO DE PET A PARTIR DEL USO DE UN METODO DE SECADO NO CONVENCIONAL

CAMPOS GABRIELA CLARISA

CRUCES JOAQUÍN PEDRO

Directora: **Dra. Valeria Pettarin**

Co-directora: **Dra. Alejandra Costantino**

Mar del Plata, marzo del 2022





RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

PROYECTO FINAL DE GRADO - INGENIERÍA EN MATERIALES

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE RECICLADO DE PET A PARTIR DEL USO DE UN METODO DE SECADO NO CONVENCIONAL

CAMPOS GABRIELA CLARISA

CRUCES JOAQUÍN PEDRO

Directora: **Dra. Valeria Pettarin**

Co-directora: **Dra. Alejandra Costantino**

Mar del Plata, marzo del 2022



AGRADECIMIENTOS

Primero nos gustaría agradecer a nuestra directora, Dra. Valeria Pettarin, por su gran compromiso hacia nosotros, por tener mil cosas que hacer y siempre hacernos un lugar para atender nuestras necesidades. A la segunda persona que queremos agradecer y no menos importante es a nuestra co-directora, Dra. Constantino Alejandra, por su gran apoyo hacia nosotros, por sus críticas constructivas y por siempre guiarnos de la mejor forma. A ambas por siempre bancarnos en los momentos difíciles que pasamos y por las risas en los momentos donde se necesitaban.

Un especial agradecimiento a Andrés del grupo de COMP de INTEMA, en cuanto a todo el desarrollo experimental, a todos los ensayos que fuimos haciendo, él y su gran paciencia, nos ayudan día a día con cada inconveniente que surgía. La persona que quieres que haya no una sola, sino miles.

A nuestros compañeros de la facultad por ayudarnos y hacer disfrutables todas las horas que pasamos juntos. Les agradecemos a los que están desde siempre y a los que estuvieron parte del camino.

A nuestras familias, que sin ellos nada de esto podría haber sido posible. A nuestros padres, abuelos que están y que ya no están y hermanos.

A Esteban y Lucas, que dieron una ayuda enorme a la hora de desarrollar el horno. Con todo su amor y sabiduría sin pedir nada a cambio ayudaron en esta gran causa, terminar nuestra carrera de grado. Además, una mención a Leo, amigo de Esteban, que ayudó en la confección del cilindro del horno.

Al Lic. Guido Palazzo de Ampacet por aportar material necesario para realizar el trabajo, por realizar ensayos que estaban fuera de nuestra incumbencia.

Gracias, gracias, muchas gracias!

RESUMEN

Los residuos sólidos constituyen una preocupación y un problema medioambiental que es de interés social y en la actualidad es uno de los temas fundamentales para la sostenibilidad ambiental del planeta tierra. Por esta razón el objetivo de este trabajo es proponer una alternativa más eficiente para la reutilización de desechos poliméricos, mediante el empleo de técnicas recientes y poco desarrolladas en la industria polimérica, que resulten de bajo costo y obteniendo un material de alto desempeño mecánico.

Se hizo énfasis en la etapa de secado, desarrollando un nuevo método poco utilizado a nivel industrial, el secado infrarrojo. Se propuso el desarrollo de un horno de secado infrarrojo a escala laboratorio, junto con la obtención y caracterización mecánica y térmica de piezas expuestas a distintas condiciones de secado.

PALABRAS CLAVE

Medio Ambiente, Residuos, Plástico, Polietileno-Tereftalato (PET), Reciclaje, Secado, Infrarrojo

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	1
RESUMEN	2
1) INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	6
1.1. PROBLEMÁTICA Y RELEVANCIA DEL PROBLEMA	7
1.2. RECICLADO DE POLÍMEROS	9
1.2.1. TIPOS DE RECICLADO	10
1.2.1.1. RECICLADO PRIMARIO.....	10
1.2.1.2. RECICLADO SECUNDARIO.....	11
1.2.1.3. RECICLADO TERCARIO.....	11
1.2.1.4. RECICLADO CUATERNARIO	12
1.2.2. ETAPAS DEL RECICLADO SECUNDARIO O MECÁNICO	12
1.2.2.1. RECOLECCIÓN Y CLASIFICACIÓN.....	12
1.2.2.2. TRITURADO.....	15
1.2.2.3. LAVADO.....	15
1.2.2.4. SECADO	15
1.2.2.5. CONFORMADO.....	16
1.2.3. RECICLADO DEL PET	16
1.2.3.1. SECADO CONVENCIONAL.....	17
1.2.3.2. SECADO INFRARROJO	18
1.3. OBJETIVOS	18
1.3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
2) ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO DE LOS BENEFICIOS AMBIENTALES DEL RECICLADO.....	20
2.1 INTRODUCCIÓN	21
2.2 PRODUCCIÓN DE PLÁSTICOS	22
2.3 RECICLAJE DE PLÁSTICOS	22
2.3.1. GASES DE EFECTO INVERNADERO	23
2.3.2 AHORRO DE ENERGÍA	24
2.4. CONCLUSIONES	26
3) DISEÑO Y ARMADO DE HORNO IR	27
3.1. INTRODUCCIÓN	28
3.2. OBJETIVOS.....	29
3.3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	29
3.3.1. DISEÑO COMPUTACIONAL.....	29

3.3.2.	DISEÑO CIRCUITO LÁMPARA IR	30
3.3.3.	DISEÑO CIRCUITO SENSOR DE T	32
3.3.3.1.	ARMADO	35
3.3.3.2.	CALIBRACION	36
3.3.4.	ARMADO ESTRUCTURAL.....	38
3.3.4.1.	CILINDRO	38
3.3.4.2.	ESTRUCTURA SOPORTE	41
3.3.4.3.	GABINETE	41
3.3.4.4.	SISTEMA DE ROTACIÓN.....	42
3.4.	ANÁLISIS DE COSTOS	45
3.5.	MANUAL DE USO	45
3.6.	CONCLUSIONES	45
3.7.	ANEXO.....	46
3.8.1.	ANEXO 1	46
3.8.2.	ANEXO 2	48
3.6.3.	ANEXO 3	50
4)	PROCESO DE RECICLADO.....	56
4.1.	INTRODUCCIÓN	57
4.2.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	57
4.2.1.	OBTENCIÓN DE ESCAMAS DE PET RECICLADO	57
4.2.2.	LAVADO	60
4.2.3.	SECADO	61
4.2.3.1	ESTUFA.....	61
4.2.3.2	HORNO IR	63
4.2.4.	CONFORMADO	65
4.3.	CONCLUSIONES	68
5)	EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LAS PLACAS OBTENIDAS	69
5.1.	INTRODUCCIÓN	70
5.2.	MATERIALES	70
5.3.	MÉTODOS EXPERIMENTALES DE CARACTERIZACIÓN	71
5.3.1.	ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)	71
5.3.2.	FTIR-ATR.....	72
5.3.3.	CARACTERIZACIÓN TÉRMICA	72
5.3.4.	COMPORTAMIENTO REOLÓGICO	73
5.3.5.	COMPORTAMIENTO MECÁNICO.....	74

5.3.6. COMPORTAMIENTO A LA FRACTURA.....	75
5.3.6.1. RÉGIMEN SEMI-DÚCTIL.....	78
5.3.6.2. RÉGIMEN POST-FLUENCIA.....	79
5.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	80
5.5.1. ANÁLISIS MORFOLÓGICO.....	80
5.5.1.1. ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER	80
5.5.1.2. FTIR-ATR.....	81
5.5.1.3. CARACTERIZACIÓN TÉRMICA.....	83
5.5.2. ANÁLISIS REOLÓGICO	85
5.5.3. ANÁLISIS MECÁNICO.....	86
5.5.3.1. FLEXIÓN EN 3 PUNTOS.....	86
5.5.3.2. TRACCIÓN EN CÁMARA.....	88
5.5.3.3. COMPORTAMIENTO A LA FRACTURA.....	89
5.6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	92
5.8. ANEXO	94
5.8.1 ANEXO 1	94
5.8.2. ANEXO 2	94
6) CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJO A FUTURO.....	95
6.1 CONCLUSIONES GENERALES	96
6.2 TRABAJO FUTURO.....	97
7) BIBLIOGRAFIA.....	98

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. PROBLEMÁTICA Y RELEVANCIA DEL PROBLEMA

Los polímeros son uno de los materiales más utilizados actualmente por el hombre en su vida cotidiana debido a su gran versatilidad, bajo costo, posibilidad de ser conformados en geometrías complejas, y a sus atractivas propiedades físico-químicas. Sin embargo, uno de los problemas que surge como consecuencia de la masividad del consumo de productos plásticos es que son desechados al medio ambiente una vez terminada su vida útil. Desde la década de 1950, el crecimiento en la producción de polímeros ha superado en gran medida a la de cualquier otro material. Estos se pueden clasificar de diferentes maneras y una de ellas es la división entre plásticos duraderos y los de un solo uso. Los plásticos duraderos, a diferencia de la mayoría de los envases y artículos que se desechan después de un solo uso, tienden a tener una vida útil promedio de 3 años. Partes plásticas de automóviles, computadoras, electrodomésticos, alfombras y telas entran en esta categoría. El uso de polímeros en aplicaciones duraderas continúa creciendo a medida que los ingenieros de diseño, los fabricantes y los consumidores siguen confiando en su rendimiento, bajo costo y beneficios.^[1] Sin embargo, los productos plásticos de consumo duraderos no contribuyen significativamente a la problemática asociada a la acumulación de desechos a nivel mundial. El problema surge principalmente de los productos de corta vida útil, llamados también de “uso único”, por ejemplo, los embalajes plásticos.^[2] Desafortunadamente, en los últimos años se ha visto en el sector productivo un cambio global en la producción de plásticos duraderos a plásticos de un solo uso: existe un alto porcentaje de plásticos utilizados en la industria del embalaje (o *packaging*) que son desechados inmediatamente luego de su primer uso, como se muestra en la **Figura 1-1**. Se puede observar que alrededor del 36% de los plásticos se utilizan para aplicaciones tales como envoltorios, embalajes y artículos de consumo descartables.

La producción de plásticos depende en gran medida de los hidrocarburos fósiles, que son recursos no renovables. Si el crecimiento de la producción de plásticos continúa al ritmo actual, para 2050 la industria del plástico puede representar el 20% del consumo total de petróleo del mundo.^[3]

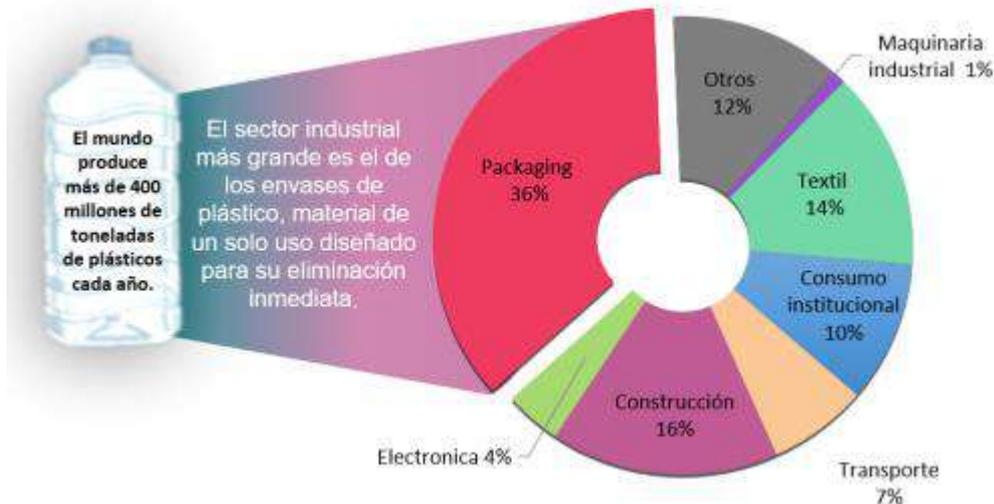


Figura 1-1 Producción global de plásticos según el sector industrial en 2015. Adaptado de ONU *Environment* 2018.

Dentro de los plásticos de consumo masivo el polietilentereftalato (PET) es uno de los más utilizados ya que presenta propiedades atractivas para elaborar envases y empaques, que como se dijo es un sector de la industria que representa una tasa de producción y subsecuente consumo muy alta. El PET es un poliéster aromático y forma parte del grupo de los termoplásticos, es decir, puede fundirse y remodelarse, razón por la cual es posible en principio reciclarlo de esta forma.^[4] El PET tiene una estructura química como la que se ve en la **Figura 1-2**.

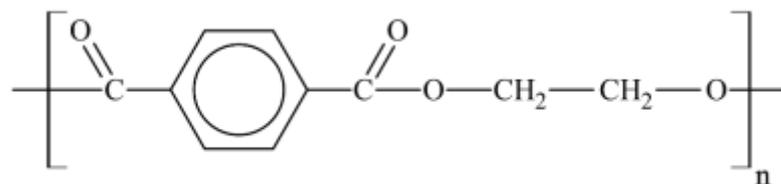


Figura 1-2. Estructura de la unidad repetitiva del PET

En el año 1952 se comenzó a utilizar PET en forma de película para el envasado de alimentos y a partir de 1976 se lo empleó en la fabricación de envases ligeros, transparentes y resistentes, principalmente en el mercado de bebidas. Su excelente propiedad de barrera a los gases, transparencia, buena resistencia mecánica y posibilidad de uso para contacto con alimentos, lo ha llevado a ser el material de mayor uso en la industria de envases.^[4]

Una botella de PET tarda más de 150 años en degradarse una vez arrojada a la basura. Sin embargo, tiene un gran potencial de reciclado y actualmente se podrían fabricar fibras textiles

o nuevos envases a partir del PET desechado. En Argentina se producen y descartan unas 200.000 toneladas de envases PET por año ^[5], y si bien en teoría son reciclables, tan solo 70.000 toneladas (30% en peso) se recuperan para tal fin. Estas montañas de plástico además de un enorme daño ambiental generan una oportunidad de negocios desaprovechada. El reciclado de PET está poco explotado en Argentina. Según un informe reciente de la Universidad de Palermo esto se debe a la informalidad en la recolección y acopio, la falta de precios uniformes para el material y de una logística adecuada, la insuficiente separación de residuos en el hogar y la ausencia de una ley que obligue a las empresas a hacerse cargo de los envases post consumo o reutilizarlos. ^[5]

La mitad de los envases que se recuperan post consumo en el país, se lava y tritura para exportar a china para la fabricación de fibra textil. La otra mitad es procesada para la reutilización en envases. A pesar de la enorme potencialidad del PET para ser reciclado, a nivel industrial las nuevas botellas incorporan sólo un 20% del mismo, debido a las limitaciones y desventajas que conlleva su uso. ^[5] Una desventaja particular del PET es su fuerte naturaleza higroscópica, por lo que debe someterse estrictamente a un proceso de secado a fin de evitar pérdida de propiedades, tanto en el caso de PET virgen como en el PET reciclado. Para ello se utilizan diversos métodos, lo que le confiere a su ciclo de reciclado una etapa extra en comparación con otros polímeros, que se traduce en costos adicionales. ^[4] Por otro lado, el uso de PET reciclado en la fabricación de nuevos envases podría traer múltiples ventajas. Para fabricar piezas a partir de material reciclado solo se necesitan botellas de PET post consumo, mientras que para fabricar una tonelada de pellets de PET virgen se consumen 3,8 barriles de petróleo. Otra ventaja importante es que el reciclado de materiales poliméricos requiere un 70% menos de energía y emite un 59% menos de gases de invernadero ^[5] responsables en gran medida del cambio climático, que la fabricación de polímero virgen. Por otro lado, el reciclado podría generar miles de empleos en la recolección y separación de envases además de reducir el volumen y los costos de mantenerlos en rellenos y basurales. ^[5]

1.2. RECICLADO DE POLÍMEROS

Como se mencionó anteriormente el reciclado de polímeros es un método para disminuir el agotamiento de los recursos y el impacto ambiental provocado por la acumulación de residuos provenientes del uso masivo de estos materiales. Es una de las alternativas más importantes para reducir este impacto y representa una de las áreas más dinámicas de la industria de los

polímeros en la actualidad. A continuación, se describirán con mayor profundidad algunos conceptos básicos relacionados a la ingeniería del reciclado.

1.2.1. TIPOS DE RECICLADO

El reciclado puede clasificarse en cuatro tipos según el proceso involucrado: reciclado primario, secundario, terciario y cuaternario, cuyos procesos se esquematizan en la **Figura 1-3**. Las características de cada uno se detallan a continuación.

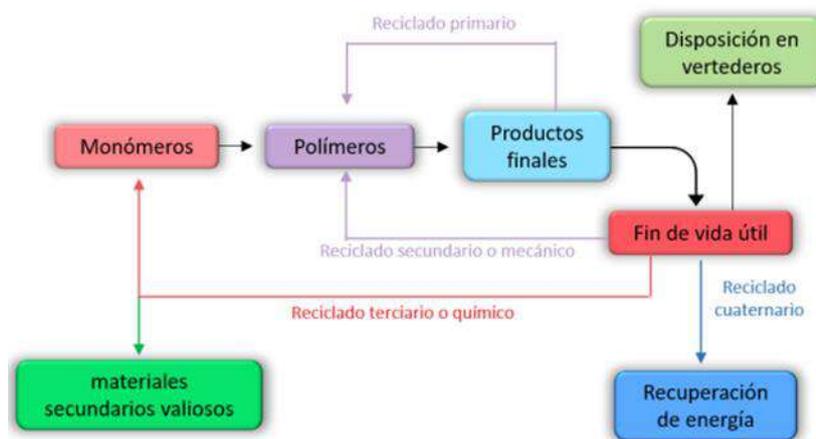


Figura 1-3. Métodos de reciclado.

1.2.1.1. RECICLADO PRIMARIO

El reciclado primario se refiere al reciclado del material de desecho en artículos con propiedades químicas y físicas iguales al artículo primario, es decir, es la reutilización de los productos en su estructura original. Este es el proceso más popular por su simplicidad y bajo costo. Sin embargo, esto puede hacerse siempre y cuando el residuo esté limpio y libre de cualquier tipo de contaminación. También hay que tener en cuenta en este tipo de reciclado, que el número de ciclos de uso del material tiene un límite.

1.2.1.2. RECICLADO SECUNDARIO

El reciclado secundario, también conocido como reciclado mecánico, consiste en el tratamiento de los residuos poliméricos por medio de presión y calor para volver a darles forma y manufacturar otros objetos iguales o distintos a los iniciales. En otras palabras, mantiene las propiedades químicas originales, pero cambia la forma física. Por ello sólo se aplica a los polímeros termoplásticos, que son aquellos que fluyen a altas temperaturas. Aunque el proceso de reciclado puede repetirse varias veces, cada vez que se lleva a cabo, algunos polímeros tienden a perder entre el 5 y 10% de sus propiedades mecánicas, tales como elongación, tenacidad y resistencia al impacto, debido a cambios en la estructura molecular. Por esta razón, en algunos casos es necesario restituir estas propiedades con ayuda de aditivos.^[6]

1.2.1.3. RECICLADO TERCIARIO

El reciclado terciario o mejor conocido como reciclado químico consiste en la descomposición química del material por diversos métodos, adecuados en función de la naturaleza del polímero, para llegar a los monómeros de partida o mezclas de hidrocarburos que luego son empleados como fuentes de productos químicos o como combustibles. En este tipo de reciclado pueden incluirse también las gomas y elastómeros. El reciclado químico se considera una vía tecnológica atractiva para reducir los desechos y las emisiones de gases de efecto invernadero, así como para promover la economía circular, lo que demuestra su contribución hacia el principio de sostenibilidad energética. Entre las siguientes metodologías con mayor aplicación tecnológica se encuentran la descomposición térmica o depolimerización química. La primera metodología utiliza temperaturas superiores a los 800°C, lo que se traduce en una gran desventaja económica. Por su parte, la principal desventaja de la depolimerización química es que ésta se puede llevar a cabo solo con polímeros de condensación tales como poliésteres, poliamidas, poliacetales, policarbonatos, etc, y no sirve para la descomposición de la mayoría de los polímeros de adición, que conforman los principales productos del sector del empaque, como las poliolefinas y el poliestireno.^[7]

1.2.1.4. RECICLADO CUATERNARIO

El reciclado cuaternario consiste en el calentamiento del polímero con el objeto de usar la energía térmica liberada en este proceso para llevar a cabo otros procesos, es decir el polímero es usado como combustible para generar energía. Este método es interesante desde el punto de vista de recuperación de energía de los materiales poliméricos, que tienen como característica un elevado poder calorífico, pero es muy criticado socialmente por los problemas ambientales que puede generar. Este proceso de combustión debe estar sujeto a rigurosos controles de las emisiones para neutralizar los residuos sólidos y los efluentes gaseosos que podrían contribuir negativamente al medio ambiente y a la salud humana. ^[8] Por los problemas ambientales que el reciclado cuaternario conlleva y las limitaciones y desventajas económicas que implica el reciclado terciario, se llegó a la conclusión de que el reciclado mecánico resulta el más adecuado y prometedor para el reciclado del PET, además de ser el más desarrollado industrialmente para este material.

1.2.2. ETAPAS DEL RECICLADO SECUNDARIO O MECÁNICO

El reciclado mecánico involucra varios pasos. Las diferentes etapas del proceso pueden variar según la tecnología que se use. Muchos de los equipos utilizados son iguales que los empleados normalmente en la manufactura de polímeros a partir de materia prima virgen, lo cual hace que este tipo de reciclado sea atractivo desde el punto de vista de la logística industrial. Las etapas que se describen a continuación son típicas de una empresa recicladora de plásticos.

1.2.2.1. RECOLECCIÓN Y CLASIFICACIÓN

El reciclado mecánico se inicia con la recolección de los desechos poliméricos y la posterior clasificación de los mismos. Un reciclado secundario eficiente involucra la separación de los materiales de acuerdo al tipo de resina, ya que la mayoría son termodinámicamente incompatibles entre sí, y presentan diferentes características. Por esto La Sociedad de la Industria de Plásticos desarrolló en 1988 el Código de Identificación de Resinas con el fin de facilitar su clasificación. Este código consta de un triángulo formado por tres flechas con un número del 1 al 7 en su interior, conocido como triángulo de *Möbius*, el cual identifica el tipo de resina utilizada en el envase. Los polímeros que se encuentran dentro de los grupos del 1 al 6 se les denomina "*commodities*" ya que son los que más se consumen en la actualidad,

mientras que los materiales que se encuentran en la categoría 7 suelen ser polímeros poco utilizados, muy especiales o de ingeniería. En la **Tabla 1-1** se observa la identificación.

Tabla 1-1. Código de identificación de resinas.^[9]

Simbolo	Tipo de plástico	Propiedades	Usos comunes
 PET	Tereftalato de polietileno (PET)	Contacto alimentario, resistencia física, propiedades de barrera y resistencia química.	Bebidas, refrescos y agua, envases para alimentos (aderezos, mermeladas, cremas, etc).
 HDPE	Poliétileno de alta densidad (HDPE)	Poco flexible, resistente a químicos, opaco, fácil de pintar, fabricar y manejar.	Bolsas de supermercado, bolsas para congelar, envases para leche, shampoo y detergentes, tapas.
 PVC	Cloruro de polivinilo (PVC)	Es duro, resistente, flexible, claro y puede ser utilizado con solventes.	Envases para plomería, tuberías, mangueras, suelas para zapatos, cables, correas para reloj.
 LDPE	Poliétileno de baja densidad (LDPE)	Suave, flexible, translucido y se raya fácilmente.	Película para empaque, bolsas para basura, envases para laboratorio.
 PP	Polipropileno (PP)	Difícil pero aun flexible, translucido, soporta solventes y versátil.	Bolsas para frituras, equipo para jardinería, cajas para alimentos, envases para uso veterinario y farmacéutico.
 PS	Poliestireno (PS)	Claro, rígido, opaco, se rompe con facilidad y es afectado por gases y solventes.	Cajas para discos compactos, cubiertos de plástico, imitaciones de cristal, juguetes, envases de cosméticos.
 Otros	Otros (SAN, ABS, PC, Nylon)	Incluye muchas otras resinas y materiales.	Autopartes, electrónicos, piezas para empaques.

Debido a la incompatibilidad físico-química de algunos polímeros y su dificultad para ser separados, la etapa de separación resulta fundamental. La presencia de polímeros coloreados puede significar una dificultad adicional, aun tratándose de materiales basados en la misma resina. Estos polímeros son coloreados mediante pigmentos atóxicos, los cuales en su gran mayoría están basados en metales pesados (Cadmio, plomo, cromo, etc) lo cuales resultan altamente contaminantes. ^[10] Generalmente los desechos suelen separarse por tonalidades de colores, por ejemplo, para el caso del rojo, va desde el rosado hasta el rojo oscuro. De no separar por colores, la mezcla de productos reciclados de distinta tonalidad

puede dar lugar a piezas de colores opacos y oscuros que son menos cotizados en el mercado, ya que los polímeros blancos o transparentes suelen ser los que más demanda tienen. Sería posible separar los colores mediante equipos automáticos, pero la gran cantidad de variantes de colores hace que dicha separación sea inviable. Además, reciclar polímeros pigmentados representa una mayor complejidad en el proceso de reciclado ya que conlleva más tiempo conseguir las cantidades necesarias para las entregas a las plantas recicladoras y permanecen más tiempo acopiados. Las botellas transparentes se pueden reinsertar mucho más rápido en el circuito, y permiten reunir una mayor cantidad de toneladas.

Un claro ejemplo de esta problemática fue el cambio de paradigma que adoptó la marca de bebidas Sprite, que en varios países decidió recurrir al plástico transparente y quitar definitivamente el color verde de su botella, un color que los venía acompañando desde 1959. Además de resultarles favorable desde el punto de vista económico (ya que se eliminó el uso de aditivos colorantes) la eliminación del color en las botellas favoreció su reciclado (Figura 1-4).^[11]



Figura 1-4. Propaganda de la nueva botella transparente de Sprite.

La clasificación puede llevarse a cabo en forma manual o mecánica. La primera forma es llevada a cabo por recicladores que deben adquirir anteriormente la habilidad de separar y clasificar los materiales poliméricos, para esto es de gran ayuda la codificación nombrada anteriormente. La forma mecánica se puede dar mediante bandas transportadoras y dispositivos con sensores térmicos, espectroscopios infrarrojos, entre otros.^[6]

1.2.2.2. TRITURADO

Los polímeros una vez clasificados son reducidos de tamaño, este proceso generalmente se realiza en un molino o una trituradora, obteniéndose hojuelas de polímero conocidas como *scrap*, de un tamaño aproximado a un centímetro.

1.2.2.3. LAVADO

En esta etapa se separan algunos residuos (orgánicos, tierra, restos de etiquetas, etc.) del polímero molido. El *scrap* se limpia usualmente con agua, detergente industrial y soda cáustica. El lavado puede ser a diferentes temperaturas (lavado en frío o temperatura ambiente, lavado medio a unos 40 °C o lavado en caliente de 70 °C a 90 °C). Se puede encontrar un único equipo de lavado o varios dispuestos, normalmente, en línea. El agua y detergente industrial se usan para eliminar grasas y otros elementos físicos (etiquetas, pegamento, etc). La soda cáustica se usa para desinfectar, eliminando restos orgánicos si existiesen. Si el material está limpio no es necesario el uso de detergentes y soda cáustica. Luego es enjuagado con agua fría para retirar los restos de detergente y soda cáustica. Mediante los sucesivos lavados se separan además otra serie de impurezas como poliolefinas, papeles y otros residuos por diferencias de densidad y flotación. La técnica de flotación es una de las más utilizadas y permite diferenciar los tipos de polímeros según su densidad. Los polímeros que presentan una densidad igual o menor que la solución flotan, mientras que los restantes se hunden.^[6]

1.2.2.4. SECADO

Una vez limpio, el *scrap* es secado con el objeto de retirar los restos de humedad. Esta humedad está presente tanto en la superficie del material como en el seno del mismo, por lo tanto, se debe garantizar la eliminación de agua de ambas partes. Esta etapa puede ser realizada por varios métodos. La temperatura de secado depende del tipo de polímero que se desea secar y el tiempo de secado depende del método de secado empleado.^[6]

1.2.2.5. CONFORMADO

En este proceso, la escama ya limpia y seca es sometida a un posterior conformado (con temperatura y presión) para la obtención del producto final. Este proceso es un tratamiento principalmente térmico y produce que se modifiquen ciertas características de la escama y que ciertos volátiles o contaminantes se eliminen.

1.2.3. RECICLADO DEL PET

El PET es un polímero de condensación termoplástico que se sintetiza a partir de ácido tereftálico o tereftalato de dimetilo y etilen glicol. Es un material polar, con gran estabilidad dimensional, rigidez, buenas propiedades de barrera y resistencia a la abrasión. Debido a su naturaleza termoplástica puede ser moldeado fácilmente mediante extrusión e inyección, y puede además reciclarse mecánicamente. Sin embargo, la tendencia a absorber agua del PET junto con las altas temperaturas de los procesos de transformación puede generar procesos de hidrólisis en dicho material, los cuales pueden degradar y afectar sus propiedades mecánicas finales. Estos procesos hidrolíticos además disminuyen la viscosidad intrínseca (VI) del material durante el procesamiento. La VI sirve como indicación de la longitud media de las cadenas del polímero. Cuanto mayor sea la VI, más largas son las cadenas de polímero y mejores sus propiedades mecánicas. Por lo tanto, es evidente que la etapa de secado resulta clave para obtener productos reciclados a partir de PET con propiedades mecánicas competitivas.

El PET suele absorber hasta un 0.6% en peso de agua, dependiendo de las condiciones del lugar donde sea almacenado. Como el material reciclado no está almacenado en condiciones controladas éste llega a su umbral de saturación de agua, es decir: absorbe toda la humedad posible. Este valor puede reducirse hasta un 0.2% en peso si el polímero se mantiene en un lugar cubierto y seco durante periodos cortos de tiempo. Sin embargo, para fabricar un producto competitivo de PET, se requiere reducir la humedad a menos de 0.004% (40 partes por millón) antes de procesar el material.^[12] Esto refuerza la idea de que la etapa clave para procesar PET es el secado, es decir, la efectividad con la cual se logre extraer la humedad absorbida por el material previo a ser procesado. La velocidad de absorción de agua para una muestra dada de polímero termoplástico depende de cuatro factores: tiempo, temperatura, humedad atmosférica (punto de rocío) y la cristalinidad de la resina. EL PET amorfo absorbe humedad más rápidamente que el PET cristalino, como se observa en la

Figura 1-5. Por este motivo es necesario garantizar que el PET luego de ser secado sea lo más cristalino posible. ^[12]

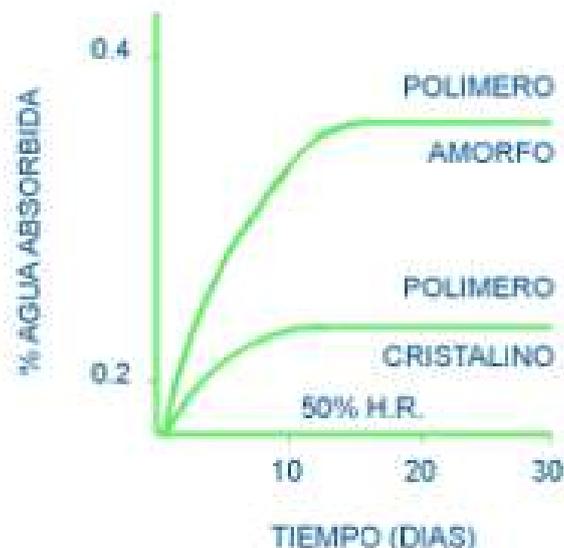


Figura 1-5. Absorción de humedad del PET ^[12]

1.2.3.1. SECADO CONVENCIONAL

Este tipo de secado se lleva a cabo mediante estufas de convección. Mediante este método el PET es secado a una temperatura alrededor de unos 170 °C durante un mínimo de 4 horas, lo que implica un gran consumo energético. Al calentarse el aire dentro de la estufa se produce un calentamiento de la superficie del material mediante transferencia de calor eliminando primeramente la humedad superficial. Posteriormente el calor se transfiere al seno del material y la humedad residual es transferida hacia la superficie. Si el flujo de aire no resulta suficiente el material no llegará a calentarse homogéneamente a la temperatura necesaria durante el tiempo de residencia y el polímero presentará humedad residual. Por lo tanto, el tiempo y la temperatura resultan dos parámetros claves para este tipo de secado. ^[13] Otro parámetro importante es el punto de rocío, que es una medida del contenido de humedad absoluta del aire (g vapor de agua por m³ de aire). Este parámetro debe ser controlado lo cual conlleva a un gasto energético mayor y complejiza mucho el proceso. Para secar la mayoría de los polímeros higroscópicos es suficiente una temperatura de punto de rocío de aproximadamente 20°C. Sin embargo, es importante tener en cuenta, que temperaturas muy bajas de punto de rocío requieren un importante consumo de energía para secar el aire. ^[14]

1.2.3.2. SECADO INFRARROJO

La mayor diferencia de este tipo de secado comparado con el convencional es que el secado infrarrojo produce calor directamente sobre el seno del material sobre el que incide. Así el calor se utiliza únicamente donde es necesario y no se dispersa en el aire. Esto conlleva un importante ahorro de energía y tiempo de secado, optimizando el proceso. El secado infrarrojo se lleva a cabo mediante la emisión de radiación infrarroja que se propaga en línea recta como la luz, la cual es absorbida por el material aumentando la temperatura y favoreciendo el secado. El calentamiento y secado ocurre desde el seno del material irradiado hacia fuera.^[15] Además, el secado infrarrojo podría tener una mayor eficiencia a la hora de cristalizar el PET lo cual sería una ventaja ya que los cristales actúan como barrera a la absorción de humedad durante su transporte hasta ser finalmente procesado.^[16] Si bien este tipo de secado es de uso reciente y aun no se utiliza a escala masiva en las industrias, resulta un método sumamente prometedor para optimizar el ciclo de reciclado del PET y resinas higroscópicas.

1.3. OBJETIVOS

De lo expuesto anteriormente surge la motivación de esta tesis que es contribuir a la propuesta de una alternativa más eficiente para la reutilización de desechos poliméricos, mediante el empleo de técnicas recientes y poco desarrolladas en la industria polimérica, que resulten de bajo costo y obteniendo un material de alto desempeño mecánico.

El objetivo principal es la obtención de placas de PET reciclado haciendo énfasis en la etapa de secado, desarrollando un nuevo método poco utilizado a nivel industrial, el secado infrarrojo. La idea subyacente es optimizar dicha etapa obteniendo propiedades mecánicas similares o superiores a la de piezas de PET reciclado sometido a otros métodos de secado.

Para ello se propone el desarrollo de un horno de secado infrarrojo a escala laboratorio, junto con la obtención y caracterización de piezas expuestas a distintas condiciones de secado. La caracterización propuesta incluye la evaluación de la relación entre el comportamiento mecánico y a la fractura, con las variables reológicas, térmicas y estructurales de los materiales.

1.3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener escamas de PET a partir de desechos plásticos.
- Desarrollar un horno de secado infrarrojo.
- Obtener placas de PET reciclado y virgen (estos últimos a fines comparativos) con dos métodos de secado: en horno convencional y en horno IR.
- Estudiar propiedades mecánicas, térmicas y reológicas de las piezas de PET reciclado y virgen obtenidas.
- Analizar la relación humedad/procesamiento/comportamiento de los materiales.
- Estudiar el efecto del reciclado de PET en el medio ambiente.

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO DE LOS BENEFICIOS AMBIENTALES DEL RECICLADO

2.1 INTRODUCCIÓN

Se sabe que la principal causa del cambio climático es el aumento de la temperatura planetaria debido a un exceso de diferentes Gases de Efecto Invernadero (sobre todo del CO₂). Paralelamente, la economía actual está basada en la explotación de combustibles fósiles como el carbón y el petróleo, los mayores emisores de CO₂ del planeta. Esto ilustra la paradoja que existe entre desarrollo económico y sustentabilidad y deja de manifiesto los desafíos que los ingenieros deben afrontar activamente.

La producción de plástico en particular, aunque en menor medida, contribuye al calentamiento global del planeta. El plástico destinado a la fabricación de bolsas, botellas, *packagings* o envases como champús, puede generar emisiones de tres formas diferentes: durante su producción, durante el reciclaje y al degradarse en entornos naturales. Los plásticos además de contaminar los ecosistemas naturales poniendo en riesgo la fauna y la flora terrestre, dejan una huella de carbono a su paso. Esta huella mide la totalidad de gases de efecto invernadero emitidos por efecto directo o indirecto por un individuo, organización, evento o producto.

Otra forma de evaluar comparativamente el impacto ambiental de productos de consumo fabricados con distintas materias primas es el análisis del ciclo de vida (ACV) que es una de las herramientas más modernas y eficientes, y por lo tanto usadas extensivamente en todo el mundo. El ACV tiene en cuenta todos los recursos usados para la fabricación, distribución, consumo y disposición final de un producto, así como todas las emisiones gaseosas, líquidas y sólidas y su impacto en el ambiente, que se generan durante el ciclo de vida en cada una de estas etapas.

El estudio ACV generalmente comienza con la extracción de materia prima y termina con los productos finales que salen de la puerta de la fábrica. Es lo que se denomina un estudio “de la cuna a la tumba” que comienza con la extracción de materia prima y termina con la eliminación del producto en vertederos, incineración o reciclaje. Un estudio de principio a fin es el que comienza con el mismo proceso y considera no sólo la disposición final sino también la recuperación de energía de la incineración o el reemplazo de la materia prima debido al reciclaje de los productos estudiados.

En este capítulo se hará una comparación entre la contaminación ambiental que genera la producción de PET y la que genera su reciclado.

2.2 PRODUCCIÓN DE PLÁSTICOS

Los plásticos son materiales derivados de hidrocarburos como el gas natural o compuestos orgánicos como el petróleo. Para ser producidos, deben pasar por un proceso de destilación en una refinería donde se generan diferentes polímeros compuestos por monómeros como el etileno, el propileno o el PET.

Tanto en el proceso de separación y obtención de la materia virgen, en la refinería, como durante el posterior proceso de fabricación del producto final, se generan emisiones de CO₂. El principal problema del plástico, además de su lenta degradación, es que para elaborarlo se utilizan energías no renovables. Según el informe del Centro Internacional de Ley Ambiental, en la actualidad la producción de plástico supone el 3,8% de las emisiones de carbono y se calcula que para el año 2050 va a ser responsable del 13% de ellas.^[17]

La mayoría de los ACV realizados para diversos usos plásticos muestran que el plástico presenta una mejor performance que las alternativas desde una perspectiva de carbono. Sucede incluso que, a igualdad de peso, algunos tipos de plástico tienen una mayor huella de carbono que otros tipos de envases, sin embargo, se usa menos cantidad de plástico reduciendo el impacto general, ya que el plástico es poco denso. El plástico presenta una mejor performance por un tiempo mayor, por ejemplo, el polietileno de baja densidad o las bolsas tejidas de polipropileno, tienen un mayor impacto climático y energético que el papel, pero son más duraderos y se utilizan por períodos de tiempo más prolongados, extendiendo la vida útil del mismo. Es por esto que muchos materiales utilizados como alternativas al plástico en los envases, como el algodón, el vidrio, el metal o los bioplásticos, tienen un impacto de CO₂ o uso de agua significativamente mayor en comparación con los envases de plástico.^[18]

2.3 RECICLAJE DE PLÁSTICOS

Teniendo en cuenta la creciente demanda de plásticos, una alternativa que se posiciona cada vez mejor para mitigar la huella de carbono es fabricar productos a partir de plástico reciclado. Al observar el ciclo de vida completo de los plásticos a base de combustibles fósiles, casi dos tercios de las emisiones de gases de efecto invernadero se producen en las primeras etapas, desde la extracción de combustibles fósiles hasta la producción de resina, mientras que la conversión de la resina en tuberías, botellas, bolsas y otros productos genera poco menos de un tercio de sus emisiones.^[18]

A continuación abordaremos algunos aspectos del ACV, comparando PET virgen con PET reciclado para su uso en botellas de bebidas, que es el tema del presente proyecto final.

2.3.1. GASES DE EFECTO INVERNADERO

El uso de material reciclado de botellas de plástico tiene una importante contribución a la reducción de los gases de efecto invernadero eficazmente a la mitigación del calentamiento global y al cambio climático. En la **Figura 2-1**, se exponen las emisiones de gases de efecto invernadero, expresadas en CO₂ equivalentes, comparando el rPET (material reciclado de PET en forma de pellets) con la resina virgen.^[19] Este estudio fue realizado por *Franklin Associates Life Cycle Inventory of 100% Postconsumer HDPE and PET Recycled Resin from Postconsumer and Packaging*. Se observa una reducción del 67% cuando se obtiene PET reciclado comparado con la resina virgen.^[19]

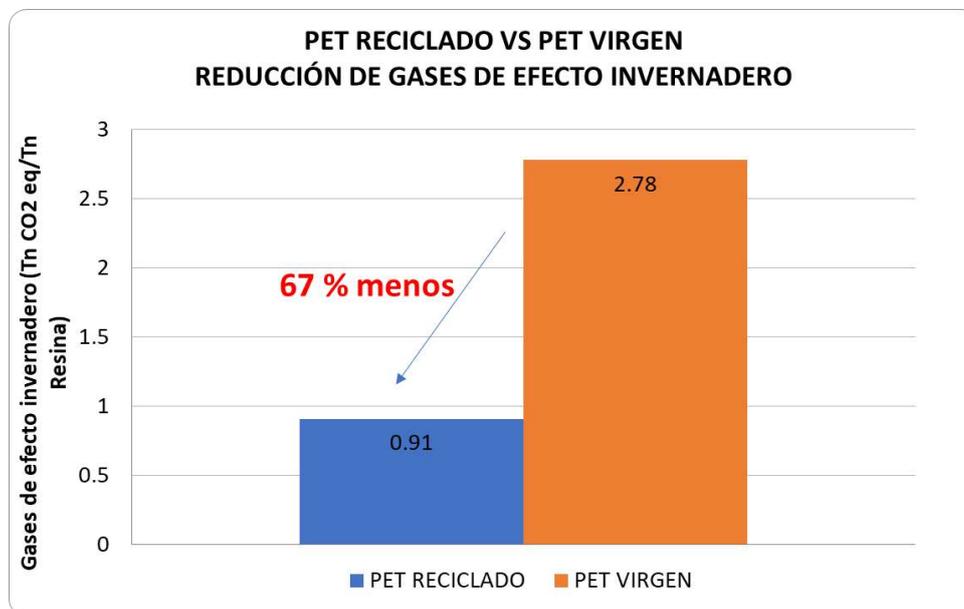


Figura 2-1. Emisión de gases de efecto invernadero para el rPET y vPET.

Para fabricar una tonelada de plástico virgen se emite 2.78 Ton de CO₂ a la atmósfera, mientras que por cada tonelada de plástico que se fabrican con materia reciclada se emiten 0.91 Ton de CO₂. Como promedio, se estima el ahorro de 1,5 Tn de CO₂ equivalente por cada Tn de PET reciclado. Esto indica que existen altos beneficios en torno a las emisiones de CO₂ al reciclar PET, evitando así, el 67% de las emisiones de gases de efecto invernadero que provienen tanto del proceso de extracción como de producción de resina. ^[20]

En la **Figura 2-2** se observa la comparación entre los gramos de CO₂ emitidos para realizar una botella de PET virgen y una de PET reciclado. Este estudio también fue realizado por los anteriores autores. Se observa una reducción de 119 gramos de CO₂ en la fabricación de las botellas de PET reciclado.

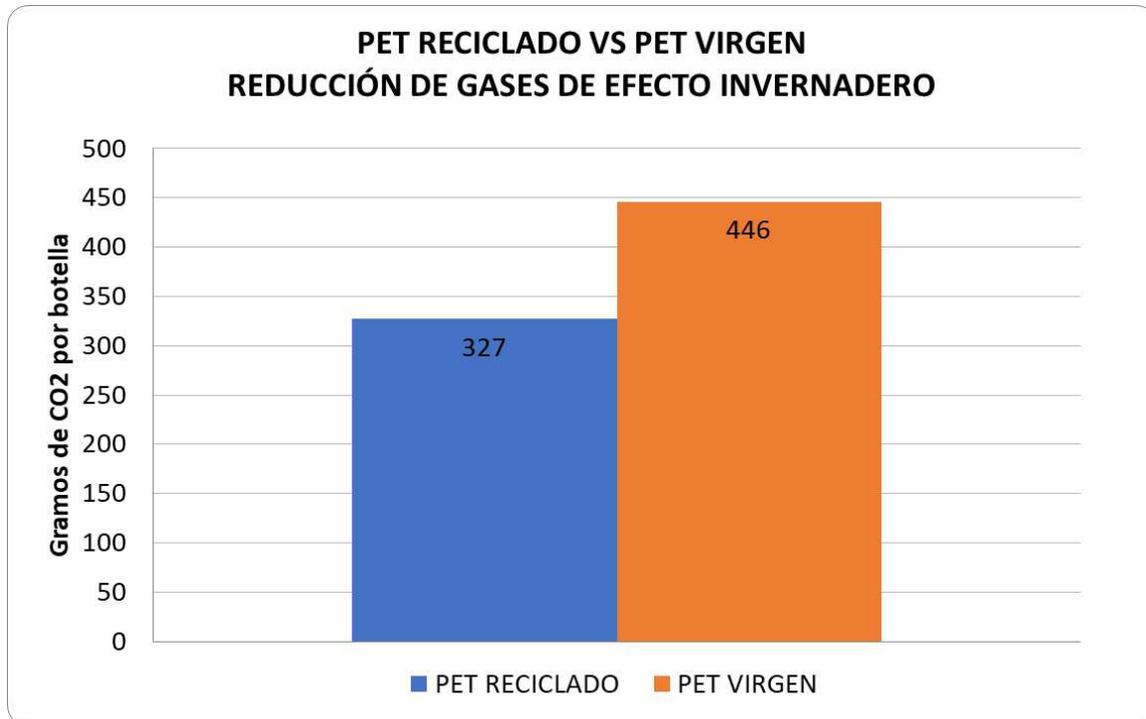


Figura 2-2. Emisión de gases de efecto invernadero para hacer botellas de rPET y vPET.

Disminuyendo los gramos de CO₂ se puede contrarrestar en parte la gran contribución que tiene este gas de efecto invernadero en la tierra.

2.3.2 AHORRO DE ENERGÍA

El reciclado del PET además se puede traducir en un ahorro importante de energía y de recursos naturales. En el gráfico de la **Figura 2-3**, se compara la energía necesaria para producir PET virgen *versus* PET reciclado en forma de pellets.^[19] El mismo fue hecho en base al estudio realizado por *Franklin Associates, a Division of ERG, Prairie, Kansas*. Se observa una reducción del 76 % en el consumo de energía. Para el reciclado no se consume la energía incluida en la materia prima, es decir, en el petróleo o gas usado para producir la resina virgen. Asimismo, la energía usada en el proceso de reciclado es sustancialmente menor comparando con la resina virgen.

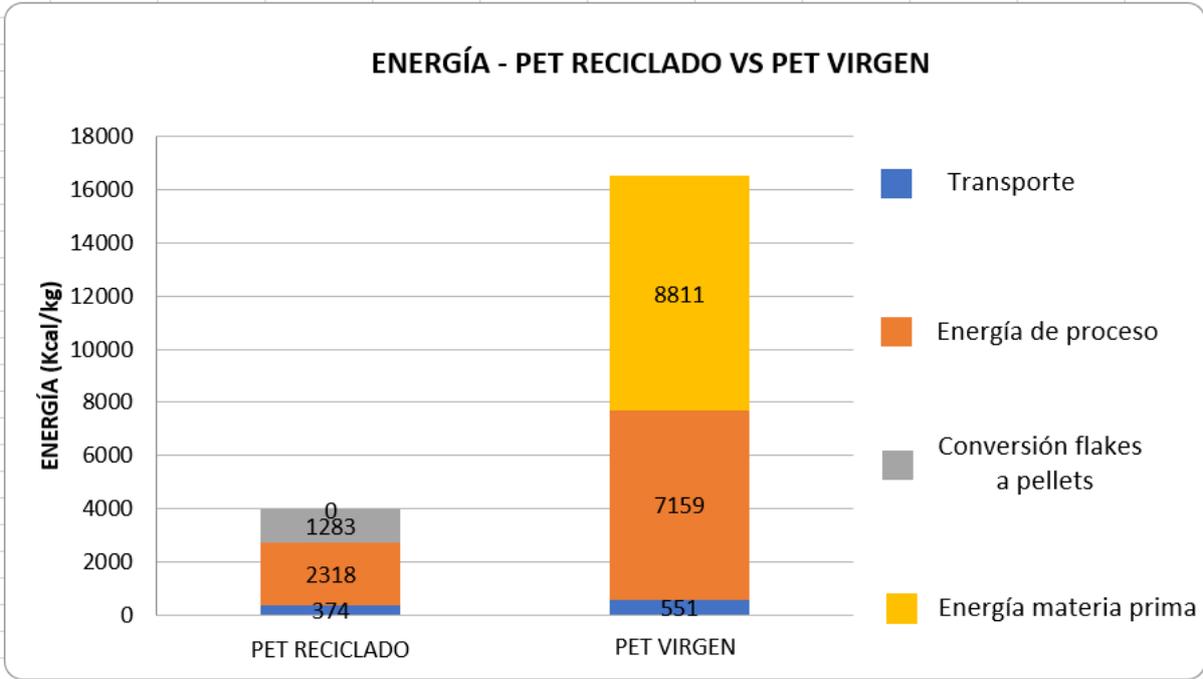


Figura 2-3. Energía consumida en la producción de rPET y vPET.

Con el objeto de visualizar el significado del ahorro de energía en el proceso de reciclado del PET se realizó el cálculo del uso de esa energía en un ejemplo práctico que se ilustra en la **Figura 2-4.** [21]



Figura 2-4. Ejemplo de ahorro de energía.

2.4. CONCLUSIONES

A partir del desarrollo de este capítulo se pudo comprender la gran importancia de utilizar PET reciclado. Se logran múltiples beneficios a la hora de reciclar; no contaminar, ahorrar recursos naturales no renovables, ahorrar costos en los procesos que se requerirían, generar puestos de trabajo: darles valor a los residuos, en vez de tirarlos.

La producción de PET reciclado genera un 67% menos de gases con efecto invernadero comparado con la producción de PET virgen. Esto suele darse en la mayoría de los materiales reciclados, el reciclado siempre le gana a la producción de material virgen en todos los indicadores ambientales. Para los materiales plásticos, parece haber un consenso en que el reciclado ahorra entre un 30% y un 80% de las emisiones de carbono que genera el procesamiento y la fabricación de plástico virgen.

Respecto del ahorro de energía, es importante resaltar que se ahorra un 76% en la producción de PET reciclado frente a la de PET virgen.

Es entonces evidente que el consumo responsable y el reciclado de las botellas de plástico para bebidas son fundamentales para aprovechar todos sus beneficios, no sólo para la seguridad de los consumidores, sino también para la economía circular.

CAPÍTULO 3

DISEÑO Y ARMADO DE HORNO IR

3.1. INTRODUCCIÓN

Como se mencionó en la introducción, el secado infrarrojo presenta varias ventajas con respecto a la técnica más ampliamente usada en la industria del plástico, el secado en estufa de aire caliente, diferenciándose principalmente por la forma de generación del calor. El horno convencional cuenta con resistencias que producen energía térmica, dicha energía es transmitida al material a través de un proceso de convección. Por su parte, el secado infrarrojo consiste en la transferencia de energía térmica desde emisores hacia los materiales mediante la radiación electromagnética. Esta energía, a diferencia de la producida por convección que necesita aire, no requiere un medio para el transporte del calor. Las ondas penetran en el material, produciendo una vibración de las moléculas de agua y dicha vibración produce energía térmica. Cuanto penetre en el material depende de la longitud de onda de la onda electromagnética.

Los secadores infrarrojos hacen un uso más eficiente de la energía llegando a reducir los costos de la misma hasta en un 45% con respecto a las técnicas convencionales.^[22], requieren un tiempo de secado corto y su funcionamiento no se ve limitado por el punto de rocío del aire por lo que permite usarlos sobre todo en aplicaciones con altos grados de humedad de entrada. Sin embargo, esta tecnología en la industria no es habitual ya que representa un cambio en el paradigma del secado y eso conlleva a una nueva inversión a afrontar.^[23]

Algunas desventajas que hay que tener en cuenta con el secado infrarrojo son que la superficie del material se calienta rápidamente, pero no es sencillo mantener un control de la temperatura en todo el material. Estos tipos de secadores mostraron grandes resultados en la industria del café y de la madera, pero aún se siguen haciendo pruebas en la industria del plástico.

En base al potencial que tiene el secado infrarrojo sobre diversos tipos de materiales en este proyecto final se realizó la construcción de un horno IR. Dicho horno fue utilizado para investigar la eficiencia de este tipo de secado sobre los materiales plásticos y si esta tecnología modifica de alguna manera las propiedades del PET virgen y reciclado.

3.2. OBJETIVOS

El objetivo de este capítulo es la construcción de un horno de radiación infrarroja rotatorio lo más automatizado posible. La idea subyacente es mejorar los tiempos de secado de los plásticos en el proceso de reciclado de los mismos. El proceso de secado debería permitir controlar la temperatura a la cual está sometido el material en el interior, y a su vez, regular la velocidad con la que gira el tambor además de la intensidad de la luz IR utilizada para el secado.

3.3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.3.1. DISEÑO COMPUTACIONAL

Se comenzó diseñando el horno de forma computacional para determinar cuestiones estructurales como también parte del funcionamiento del mismo. Se utilizó el programa Inventor, de AutoDesk, para hacer el diseño del mismo. En la **Figura 3-1** se puede observar el horno con unas medidas generales como así sus partes principales: cilindro de almacenamiento de los plásticos con un sistema de rotación en donde incluye una reducción, el gabinete blanco en donde se encuentra el circuito electrónico y el Arduino, y una estructura que aporta estabilidad y soporta el peso. Cada parte del mismo será explicada más detalladamente en la sección del armado.

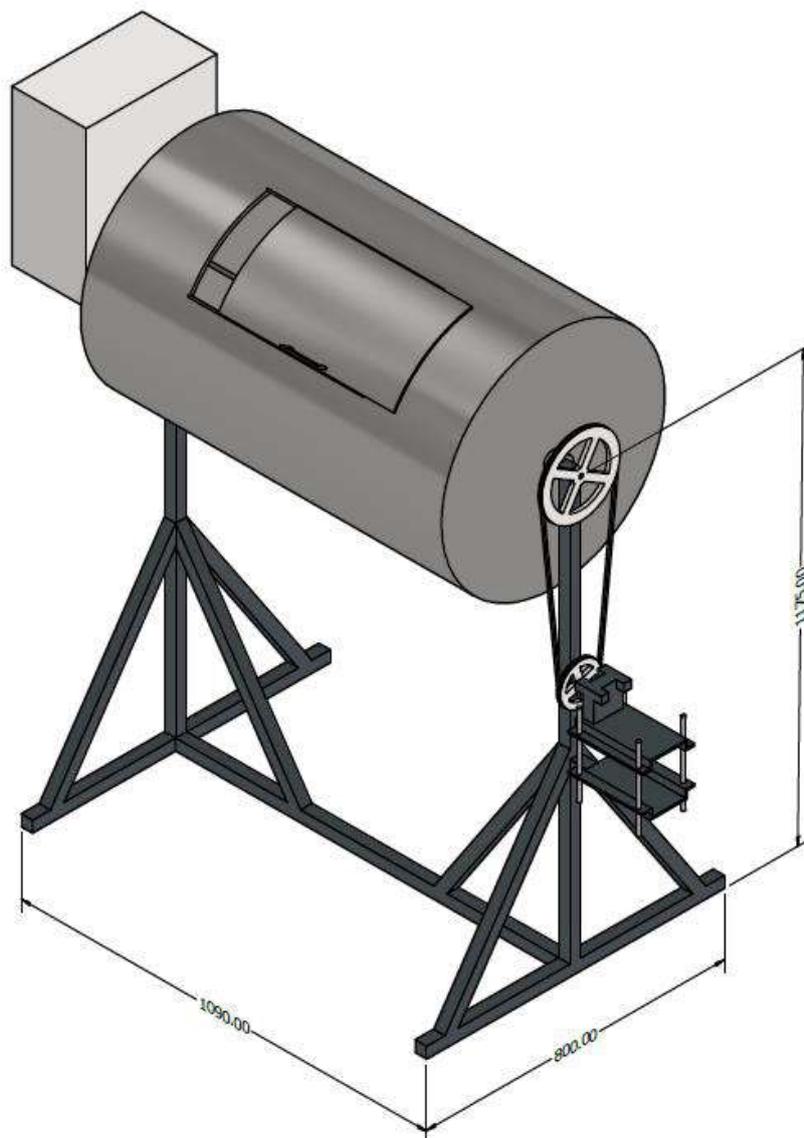


Figura 3-1. Esquema diseño del Horno infrarrojo en 3D

3.3.2. DISEÑO CIRCUITO LÁMPARA IR

Un circuito electrónico es el conjunto de elementos eléctricos conectados entre sí que permiten generar, transportar y utilizar la energía eléctrica con la finalidad de transformarla en otro tipo de energía como, por ejemplo, energía calorífica .^[24]

El circuito electrónico del horno diseñado está formado por tres componentes, a saber: un dimmer, la lámpara infrarroja y un voltímetro/amperímetro monofásico. En la **Figura 3-2** se presenta un esquema de cómo fue establecida la conexión entre dichos componentes, y a continuación la explicación detallada de cada uno.

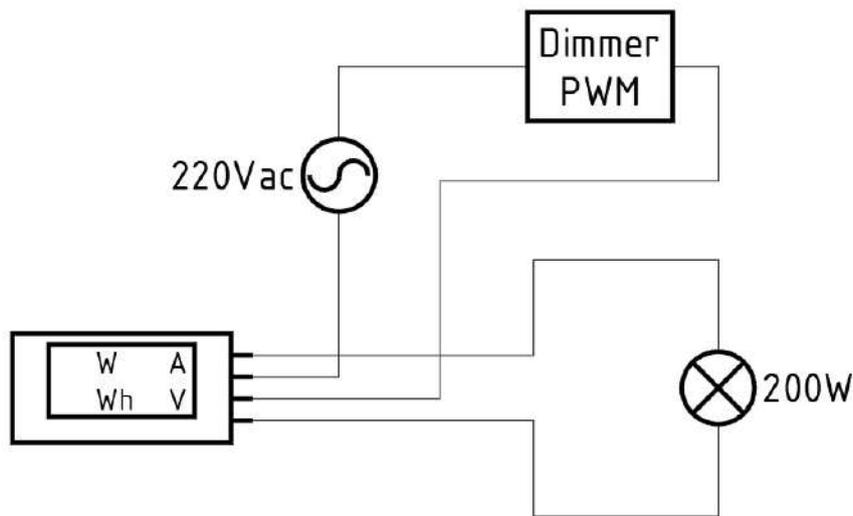


Figura 3-2. Esquema circuito.

Se utilizó una lámpara que produce ondas infrarrojas. De acuerdo con la longitud de onda emitida, los rayos pueden penetrar a distintas profundidades en el material y producir un secado desde el seno del material, además de que dicho modelo en particular produce ondas de longitud de onda corta, obteniendo una penetración mayor. Se eligió una lámpara de 2000 watts a 220 V (Modelo: IRK 13168Z, **Figura 3-3**) ya que, según la ficha técnica proporcionada por el vendedor, dicha lámpara llega a valores promedio de temperatura cercanos a los 180°C (dependiendo del material utilizado). Esta temperatura es superior a la necesaria para realizar el secado, pero, si fuera necesario, puede regularse la intensidad por medio del dimmer. Es por este motivo que se decidió sobredimensionar la potencia de la lámpara con la opción de regularla a valores menores.



Figura 3-3. Lámpara IR.

Para regular la potencia de la lámpara se utilizó un dimmer comercial tipo PWM (*pulse width modulation*). Se optó por la elección de un dimmer de 3800 watts (mostrado en la **Figura 3-4**) debido a que el consumo de la lámpara IR es de 2000 watts. El mismo funciona convirtiendo la señal senoidal proveniente de la red eléctrica en un tren de pulsos cuadrados cuyo ciclo de

trabajo (tiempo de encendido) puede ser controlado por medio de un potenciómetro. Gracias a esto se logra llevar la lámpara IR desde los 250 watts de potencia hasta los 2000 watts, y de esta forma controlar la temperatura a la que se somete la pieza a ser secada. Esto se debe a que la potencia es la capacidad que posee un cuerpo para producir trabajo, por ende, la potencia eléctrica es la cantidad de energía entregada por la lámpara, dicha energía se convierte en calor, y como conclusión al aumentar la potencia, aumenta la temperatura.



Figura 3-4. Dimmer.

Para el control de la potencia consumida por la lámpara, se incorporó un sensor digital de tensión, corriente, potencia y energía. El modelo elegido es el 220v 100^a de la marca Peacefair, que se observa en la **Figura 3-5**. Estos datos se pueden correlacionar con la temperatura lográndose un control de la misma.



Figura 3-5. Voltímetro/Amperímetro monofásico

3.3.3. DISEÑO CIRCUITO SENSOR DE T

El sistema Arduino integrado al horno es el encargado de registrar la temperatura en su interior. El arduino es una placa basada en un microcontrolador, se trata de una plataforma de hardware libre. Cuenta con un circuito integrado mediante el cual se pueden grabar instrucciones. A su vez, estas instrucciones se escriben usando un lenguaje de programación que permite al usuario establecer programas que interactúan con circuitos electrónicos.

Las funciones del Arduino se pueden resumir en 3 factores:

- **Cuenta con una interfaz de entrada.** Esta puede estar directamente unida a los periféricos, o conectarse a ellos a través de puertos.
- **La interfaz de entrada tiene como objetivo trasladar la información al microcontrolador.** El microcontrolador es la pieza que se encarga de procesar esos datos. Además, varía dependiendo de las necesidades del proyecto en el que se desee usar la placa, y existe una gran variedad de fabricantes y versiones disponibles.
- **Cuenta con interfaz de salida.** Este se encarga de llevar la información procesada a los periféricos autorizados para hacer el uso final de los datos. En algunos casos puede tratarse de otra placa en la que se centraliza y procesa la información de forma totalmente renovada, o sencillamente, puede ser una pantalla o un altavoz encargado de mostrar la versión final de los datos.

La plataforma Arduino se programa con un lenguaje propio basado en el lenguaje de programación de alto nivel Processing, lo que significa que es similar a C++, quiere decir que se trata de un lenguaje de programación de propósito general asociado a un sistema operativo llamado UNIX. Este es un lenguaje de nivel medio, trata con objetivos básicos como caracteres, números, bits, y direcciones de memoria, entre otros. Una de las ventajas que tiene es su gran portabilidad, gracias a esto, se puede utilizar para la programación de sistemas como la construcción de intérpretes, compiladores, y editores de texto. ^[25]

En el caso del horno desarrollado en este trabajo, el sensor de temperatura se colocó en una posición cercana al material puesto a secar. El sistema construido consta de varias partes: una placa Arduino, una termocupla, un display y un módulo.

- Placa Arduino: Se utilizó un Arduino UNO R3 Atmega328P, que es una tarjeta de desarrollo programable en donde se pueden conectar distintos tipos de componentes y/o módulos para buscar la función requerida. Esta placa electrónica cuenta con un microprocesador de 14 pines in/out digitales (de los cuales 6 pueden

ser utilizados como salidas PWM) y 6 entradas analógicas, un conector USB, uno de alimentación y un botón de reset (ver **Figura 3-6**).



Figura 3-6. Arduino UNO R3

- Termopar tipo K: Un termopar es un transductor formado por la unión de dos metales distintos que produce una diferencia de potencial muy pequeña que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado “punto caliente” y el otro extremo llamado “punto frío”. El termopar tipo K está compuesta de una aleación de Ni-Cr y el alumel, que es una aleación de Ni-Al. Tienen un rango de temperatura bastante amplio, la utilizada en este proyecto va de 0 a 1024°C. Se observa una imagen ilustrativa en la **Figura 3-7**.



Figura 3-7. Termocupla tipo K

- Display: Es un Arduino Shield LCD de 16x2 con teclado (**Figura 3-8**). Los pines 3,4,5,6,7,8,9 y 10 se utilizan para la interfaz con la pantalla LCD. Analógicamente el pin 0 se utiliza para leer los pulsadores. La pantalla LCD soporta ajuste de contraste y funciones de encendido/apagado de la luz de fondo.

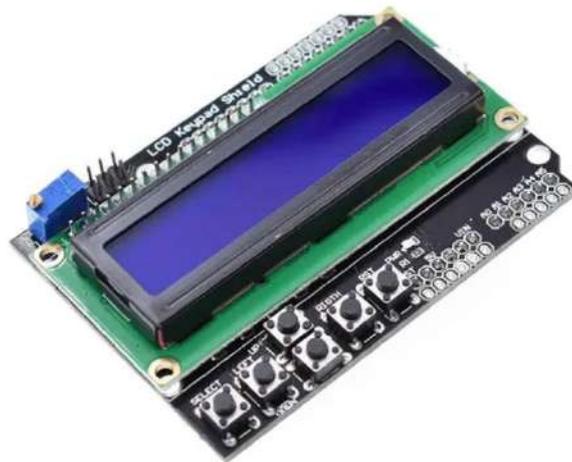


Figura 3-8. Display 16x2

- Modulo MAX6675: Es un convertidor analógico a digital especializado para termopares tipo K. Con este módulo es posible conectar fácilmente un termopar a cualquier microcontrolador a través de una interfaz SPI unidireccional. Dentro de este circuito se encuentra la electrónica necesaria para amplificar, compensar y convertir a digital el voltaje generado por el termopar. El utilizado en nuestro caso se puede ver en la **Figura 3-9**.

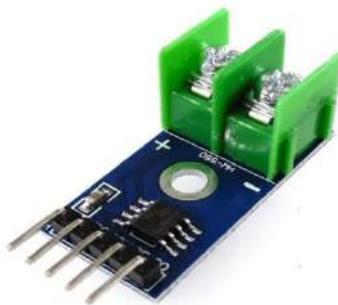


Figura 3-9. Modulo MAX 6675

3.3.3.1. ARMADO

Para la conexión entre el módulo y la placa Arduino se siguió el esquema mostrado en la **Figura 3-10**. Los pines 11,12 y 13 se utilizaron para la conexión SPI con el módulo de temperatura y luego los pines 5V y GND se utilizaron para las conexiones de la corriente y a tierra. Se utilizaron estos pines porque el display utiliza el resto de los pines para los distintos

botones con los que cuenta (estos no fueron utilizados para el proyecto realizado ya que solo se usó como display).

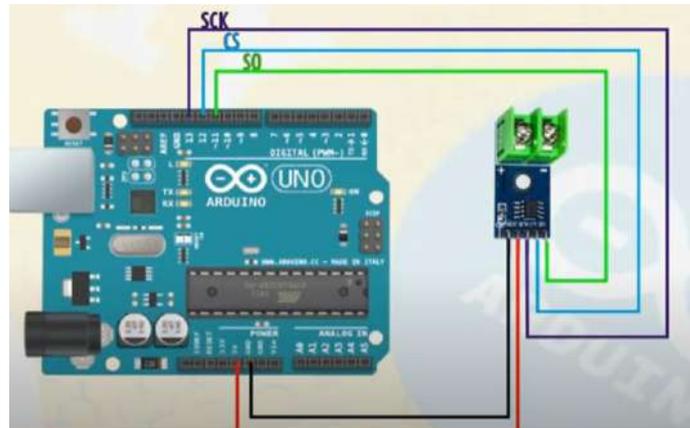


Figura 3-10. Conexión modulo-placa

Una vez terminado de colocar esto se pusieron unos bornes de separación entre la plaqueta Arduino y el display quedando armado como se observa en la **Figura 3-11**. Para su control se utilizó un código descargado de la web al que se le hicieron pequeñas modificaciones en algunas líneas y parámetros. El código se encuentra en el apartado **ANEXO 1** con una explicación de la función específica de cada línea.



Figura 3-11. Arduino armado

3.3.3.2. CALIBRACION

El sistema de medición de temperatura que se incorporó al horno censa la temperatura del aire. En el horno construido, el material es calentado con radiación infrarroja, lo que implica que las ondas penetran en el material directamente sin calentar el aire. La penetración de la onda IR es función de la longitud de onda, siendo mayor la penetración en el material a mayor

longitud de onda. Por lo tanto, el calentamiento se produce desde el seno del material hacia la superficie del mismo.

Lo que censa el Arduino es la temperatura del aire a causa de la radiación producida por todos los materiales dentro del horno y por el mismo sometimiento de la termocupla a la lámpara IR. Para poder solventar el problema de utilizar una termocupla que mide una temperatura distinta a la del material, se realizó una curva de calibración comparando lo censado por el termopar y lo medido por una pistola láser enfocando a un conjunto de pellets quietos. Dicha curva se hizo en función del tiempo a lo largo de 30 minutos a una potencia máxima de la lámpara entre 1900 y 2000 watts, y se puede observar en la **Figura 3-12**.

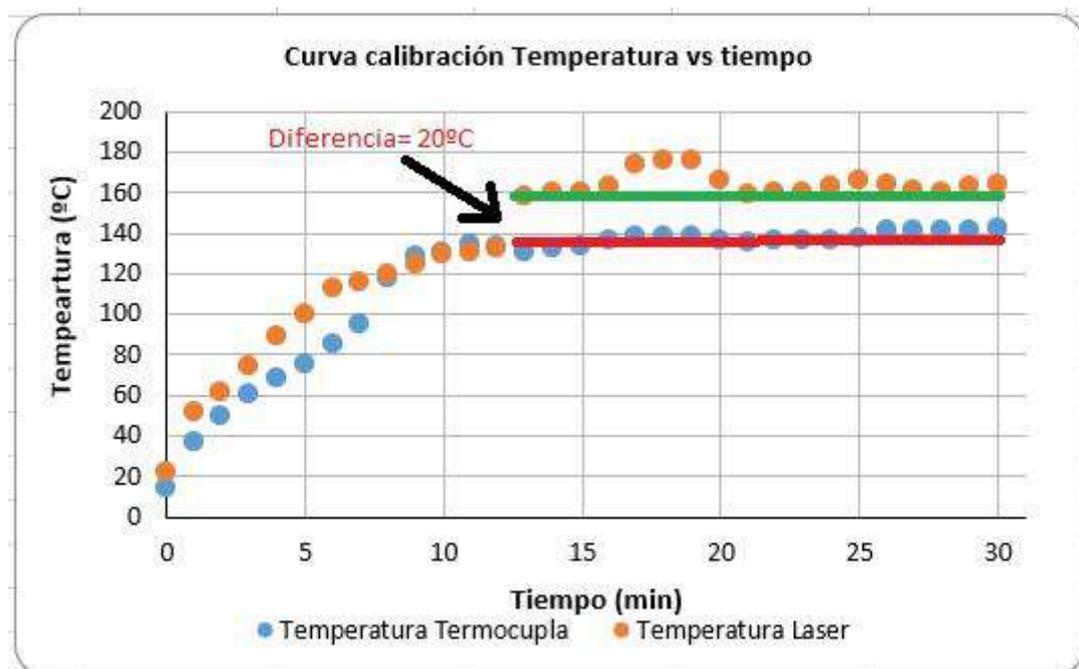


Figura 3-12. Comparación de temperaturas

De la **Figura 3-12** se observa una diferencia constante de unos 20 grados a partir de los 10 minutos entre la temperatura registrada por la termocupla y la temperatura censada por la pistola laser siendo esta última mayor. Sabiendo que la temperatura de secado varía entre 160-170°C para el PET, se deduce a partir de la curva hallada que cuando el display de la termocupla indica aproximadamente 140°C, el material dentro del horno se encuentra a la temperatura necesaria para el secado.

3.3.4. ARMADO ESTRUCTURAL

3.3.4.1. CILINDRO

La construcción del horno comenzó con el armado del cilindro, para ello se partió de una chapa de acero inoxidable 304L. Se eligió este tipo de material para garantizar que los rayos infrarrojos no atravesen el horno, debido a que pueden causar daño en la vista o la piel. Además, estructuralmente es robusto y al ser inoxidable asegura un posible uso de secado en materiales con destino a estar en contacto con comidas, por ser hipoalergénico. El cilindro construido se muestra en la **Figura 3-13**.



Figura 3-13. Cilindro de acero inoxidable 304L.

Se utilizó un conjunto de tres máquinas (**Figura 3-15**) para la elaboración estructural del cilindro:

- Bombo: se utilizó un bombo genérico con rodillos cambiables de operación manual. Se utilizó buscando la realización de molduras que ayudan a reforzar mecánicamente la estructura.

- Cilindradora: Esta máquina se utiliza para formar cilindros a partir de láminas mediante el paso a través de 3 rodillos.
- Engrapadora: Se utiliza para engrapar una chapa con otra, es muy útil a la hora hacer cerramientos ya que a veces no es posible realizar una soldadura ya sea por el tipo de material o por el espesor del mismo.



a) b) c)

Figura 3-15. a) Bombo b) Cilindradora c) Engrafadora

Es importante destacar que para darle mayor estabilidad y resistencia mecánica se realizaron unos pliegues a unos 20cm de cada tapa, como se puede observar en la **Figura 3-13**.

Luego se realizó el sistema de rotación del cilindro para que el material dentro del horno vaya cambiando la cara expuesta a la radiación durante el secado, y así lograr un secado más uniforme. Además, se tuvo en cuenta que la lámpara debe permanecer sin girar en la parte superior del horno. Para ello se diseñó un sistema de rodamientos con rulemanes y piezas realizadas en un torno. Lo que se buscó fue sostener las varillas que están dentro del horno para sostener la lámpara, y también pasar los cables necesarios para el funcionamiento del horno. En la **Figura 3-16** se observa la chapa galvanizada fija en la que se añadió un sistema de rotación a uno de los extremos (el extremo que se muestra en la figura es del lado donde va el motor). En este extremo está soldada la corona que se conecta mediante una cadena al motor. En el otro extremo del cilindro se encuentra el gabinete con todas las partes electrónicas y es por donde salen los cables de la lámpara y de la termocupla. En la imagen

de la izquierda de la **Figura 3-17** se observa el lado de adentro de dicho extremo: en el primer orificio encaja la varilla que sostiene a la lámpara IR (en forma de L), y el segundo orificio se utiliza para pasar los cables de un lado al otro, siendo necesario pasarlos por dentro del cilindro ya que es la única parte del horno que no gira. En la figura de la derecha se observa la parte de afuera del mismo extremo ya colocada sobre la tapa del cilindro, con el orificio por donde salen los cables.



Figura 3-16. Conexión cilindro-motor



Figura 3-17. Conexión cilindro-gabinete

3.3.4.2. ESTRUCTURA SOPORTE

La base se realizó a partir de caños estructurales 3x3cm huecos de 1,6mm de espesor, en este caso se buscó un espesor grande para que las soldaduras sean más sencillas de realizar, debido a que un espesor más chico puede causar huecos si no se suelda con precisión. En la imagen de la izquierda de la **Figura 3-18** se puede observar una de las patas del horno y en la derecha el sistema de soporte terminado.



Figura 3-18. Estructura soporte.

3.3.4.3. GABINETE

El gabinete de control se realizó con parte de gabinetes de computadoras reciclados a los que se les dió una forma y un tamaño adecuado para nuestro uso. Como se puede observar en la **Figura 3-19**, en el interior del mismo están las conexiones de los distintos circuitos del horno, como la fuente del motor, el regulador de la lámpara y el Arduino. Es importante destacar que el horno tiene un corte general de energía, como se observa en la foto de la derecha, y también tiene un switch On/Off para cada una de las funciones del horno (lámpara IR, giro del tambor y controlador de temperatura). Observando desde abajo hacia arriba se ve en la fotografía el display de la termocupla, luego los dos potenciómetros del motor y en la parte superior el display de la lámpara con su regulador. Además, todo el sistema cuenta con un fusible de 15A y un led de encendido.

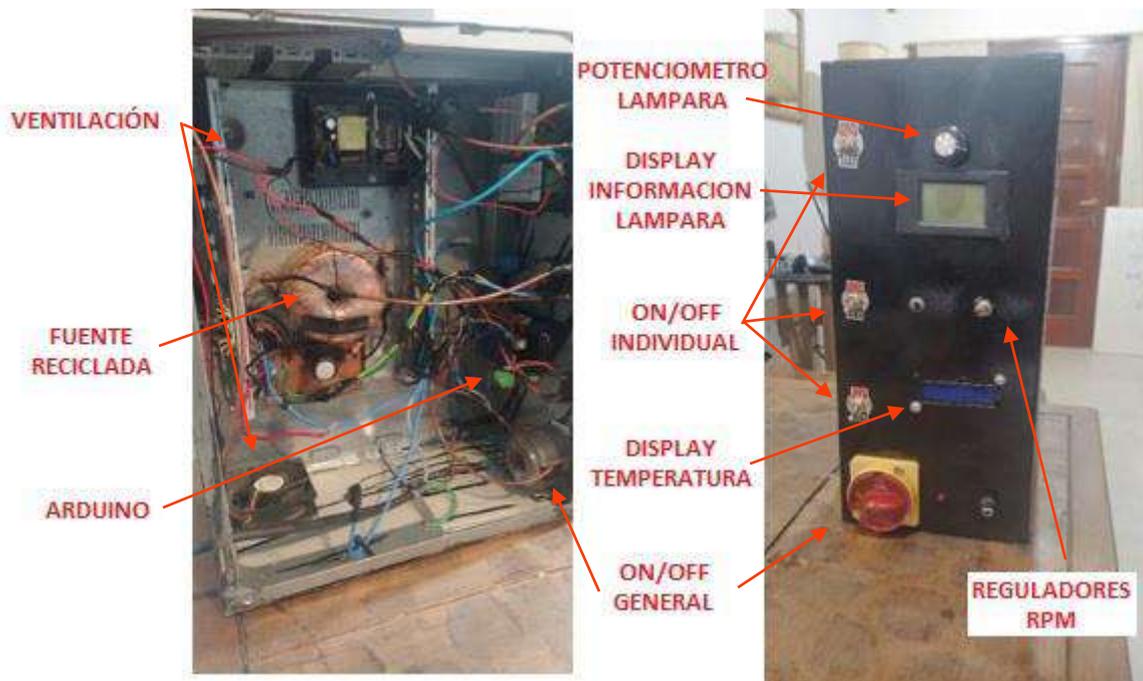


Figura 3-19. Gabinete

3.3.4.4. SISTEMA DE ROTACIÓN

El sistema de rotación del cilindro se construyó a partir de un motor de 24v conectado a una fuente de 36v con dos potenciómetros, uno de una regulación más robusta y otro con regulación más fina, para lograr las revoluciones por minuto (RPM) deseadas en el cilindro. A su vez se incorporó un sistema de reducción comercial – de la moto “Zanella” – (piñón, corona y cadena) para evitar forzar el motor que se observa en la **Figura 3-20**. Estas partes pudieron ser incorporarlas al resto del horno gracias a su buena soldabilidad por ser de acero 1045. A la derecha se observa el sistema que se diseñó para tensionar la cadena, con un total de 4 varillas roscadas y 16 tuercas.

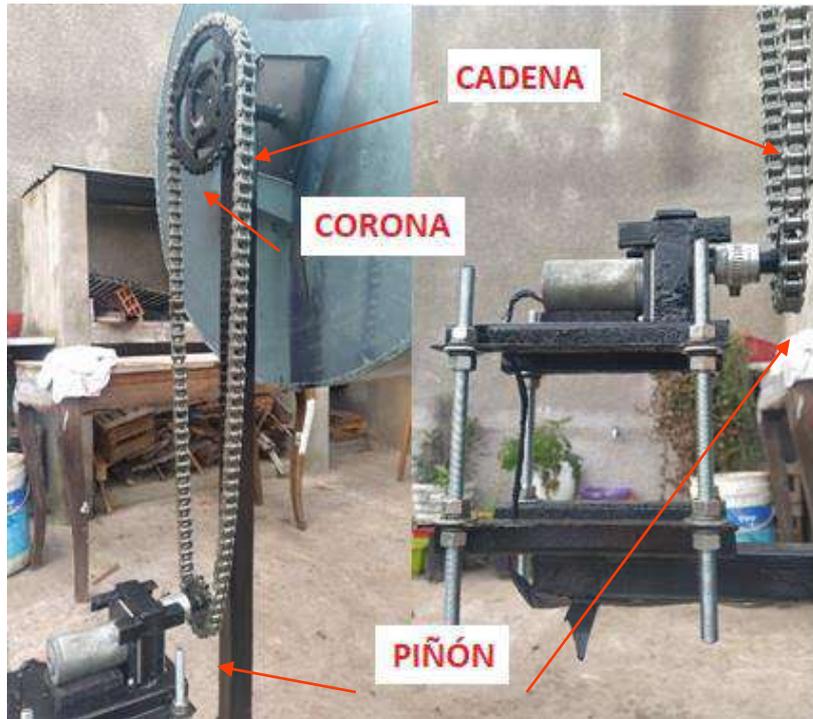


Figura 3-20. Sistema de rotación

Se pulieron todas las soldaduras y se pintó todo con antioxidante negro, excepto el cilindro, al que luego de la colocación del horno se le retiro el film protector.

En la **Figura 3-21** se muestra el sistema de calce de la L que soporta la lampara dentro del horno.



Figura 3-21. Conexión de la L con el cilindro.

En la **Figura 3-22** y **Figura 3-23** se ve el horno terminado.



Figura 3-22. Horno vista frente



Figura 3-23. Horno. Vista trasera

3.4. ANALISIS DE COSTOS

En el **ANEXO 2** se puede ver un análisis detallado de lo que costó la compra de cada componente del horno, subdividido en cada sección del mismo. El costo total del horno fue de \$45.441 pesos argentinos, erogados en el mes de marzo del año 2021, con un valor de dólar blue de \$142, lo que se traduce en un costo total de u\$s 320 dólares estadounidenses.

3.5. MANUAL DE USO

En el **ANEXO 3** se encuentra un manual de operación del horno IR donde están descriptas las especificaciones técnicas, las medidas de seguridad, las partes del horno y el instructivo de uso.

3.6. CONCLUSIONES

A partir del desarrollo del horno, se concluyó que se cumplieron satisfactoriamente los objetivos propuestos: desarrollo de un horno IR económico y práctico para un uso de laboratorio.

Así pues, de un diseño computacional se logró armar un horno con materiales reciclados con un diseño totalmente propio. Durante la construcción del horno se resolvieron muchos problemas prácticos que fueron surgiendo.

El sistema de rotación desarrollado cumple con los parámetros requeridos de velocidad para este caso particular de secado de PET, pero además permite una mayor o una menor velocidad de rotación en caso de ser necesario para trabajos a futuro.

Con respecto al sensor de temperatura, se logró medir de forma satisfactoria la temperatura de la pieza a partir de la curva de calibración desarrollada. Se encontró además que la intensidad de la lámpara elegida es la adecuada para el uso en este trabajo final. De la misma manera que la velocidad de rotación, es posible la variación de la potencia de ser necesario utilizar el horno para secar otro tipo de material.

3.7. ANEXO

3.8.1. ANEXO 1

Código Arduino

```
//MEDIDOR DE TEMPERATURA
```

```
#include "max6675.h"
```

```
#include <LiquidCrystal.h>
```

```
LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7); //Define los pines que usa el modulo LCD
```

```
float temperatura=0; //Se crea una variable flotante para almacenar la temperatura
```

```
float temperaturareal=0;
```

```
//Se definen los pines a usar para conectar el modulo MAX6675
```

```
int ktcSO = 11;
```

```
int ktcCS = 12;
```

```
int ktcCLK = 13;
```

```
MAX6675 ktc(ktcCLK, ktcCS, ktcSO);
```

```
void setup() {
```

```
    //Configurar como salida el pin 10 que controla el backlight del LCD y colocarlo en 1 logico.
```

```
    pinMode(10, OUTPUT);
```

```
    digitalWrite(10, HIGH);
```

```
    //inicializa el LCD.
```

```
    lcd.begin(16, 2);
```

```
    delay(500);
```

```
    //activa comunicacion serial.
```

```
    Serial.begin(9600);
```

```
    delay(500);
```

```

//Muestra un saludo inicial presentacion en la pantalla LCD.
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("TERMOPAR TIPO K");
lcd.setCursor(3, 1);
lcd.print("PF: G&J");
delay(5000);

}

void loop() {

//Leer temperatura.
temperatura=ktc.readCelsius();
temperaturareal=temperatura-3;

//Enviar dato de temperatura por el puerto serial.
Serial.print("Temperatura = ");
Serial.print(temperaturareal);
Serial.println(" C");

//Mostrar dato de temperatura en LCD.
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Temperatura: ");
lcd.setCursor(2, 1);
lcd.print(temperaturareal);
lcd.setCursor(9, 1);
lcd.print("C");

//Pausa de medio segundo para repetir el proceso
delay(1000);

}

```

3.8.2. ANEXO 2

Componente	Dimensiones	Cantidad	Costo	Total Costo
CIRCUITO LAMPARA				
Lampara Infrarroja Irk 13168z	0.355	1	\$6,099.00	\$6,099.00
Regulador Parrilla Eléctrica Resistencias		1	\$3,201.00	\$3,201.00
V/A Monofásico		1	\$2,394.00	\$2,394.00
Llave interruptora KN3-101		3	\$220.00	\$660.00
Fusible 6x31MM 15A		1	\$15.00	\$15.00
Cabñe caucho siliconado	2,5 metros	2.5	\$88.15	\$220.38
Portafusible Aereo		1	\$85.00	\$85.00
ESTRUCTURA				
Chapa Acero inoxidable	1,25X2,5X0,5mm	1	\$6,000.00	\$6,000.00
Redondo Macizo 5/8"	1 metro de largo	1	\$260.00	\$260.00
Caño estructural sección cuadrada	30x30x2mm (6mts de largo)	2	\$2,021.00	\$4,042.00
Caño estructural sección circular	1 metro de largo (D=1 1/2)	1	\$317.00	\$317.00
Ruleman 6202		2	\$350.00	\$700.00
PROYECTO ARDUINO				
Termocupla Tipo K	2 metros + varilla	1	\$2,010.00	\$2,010.00
Arduino Uno R3		1	\$960.00	\$960.00
Display LCD shield 16X2		1	\$740.00	\$740.00
Modulo MAX6675		1	\$940.00	\$940.00
Cables Dupont		1	\$210.00	\$210.00
Borneras de expansión shield		1	\$899.00	\$899.00
Fuente Alimentación		1	\$479.00	\$479.00
SISTEMA DE ROTACIÓN				
Corona + Piñon. Zanella		1	\$1,440.00	\$1,440.00
Motor 24v KAG Pappelweg 4 30179 Hannover + Fuente 34v		1	\$9,000.00	\$9,000.00
Arandela grower	3/8	24	\$5.27	\$126.48
Arandela plana HIE		24	\$10.96	\$263.04
Tornillo tanque zinc		4	\$6.31	\$25.24
Tuerca de acero	3/8	32	\$5.37	\$171.84
Varilla roscada zinc	1 metro	1	\$263.70	\$263.70

HERRAMIENTAS				
Mecha dormer acero	3,5mm	1	\$260.00	\$260.00
Mecha dormer acero	10mm	1	\$930.00	\$930.00
Pintura ALBALUX Negro	1 litro	1	\$880.00	\$880.00
Pintura alta tempeartura		1	\$1,850.00	\$1,850.00
			TOTAL	\$45,441.68

MANUAL DE OPERACIÓN HORNO IR

1-Especificaciones técnicas

Modelo	Peso (kg)	Tensión	Frecuencia	Consumo máximo	Medidas producto (ancho x alto x prof.)
J&G Model	50 kg	220-240V	50/60 Hz	2000 W	130x120x80 cm

2-Instrucciones de seguridad

Previo al uso de su horno eléctrico de IR, tome todas las siguientes precauciones básicas de seguridad:

- 1 • Lea todas las instrucciones.
- 2 • No toque las superficies calientes, en el momento de funcionamiento, las paredes exteriores y puertas elevarán su temperatura. Use siempre las manijas o perillas con guantes para alta temperatura.
- 3 • Para protegerse contra descargas eléctricas, no sumerja el cable, enchufe ni ninguna otra parte del horno en agua u otro líquido.
- 4 • No deje el cable colgado, ni permita que toque las superficies calientes.
- 5 • No opere el artefacto si el cable o el enchufe está dañado, o si el artefacto ha sufrido un desperfecto o daño de cualquier tipo. Lleve el artefacto al servicio técnico autorizado más cercano para su ajuste, revisión o reparación.
- 6 • Desenchufe el artefacto del tomacorriente cuando no lo use y antes de limpiarlo (extraer el material dentro).

7 • Antes de colocar o extraer partes o limpiarlo, espere a que el artefacto se encuentre frío y desenchufado.

8 • Asegúrese de que nada toque los elementos superiores o inferiores del horno.

9 • No guarde en el horno los materiales, retírelos que cada vez que termine de usarlo.

10 • Este artefacto tiene una puerta corrediza para el acceso del mismo. Usar guantes especiales para contacto con metales calientes a la hora de abrirlo.

11 • Este artefacto se encuentra apagado cuando el led del panel principal no esté prendido.

12 • No use el artefacto en exteriores.

13 • Asegúrese que el circuito eléctrico, donde enchufe el horno eléctrico, no se encuentre sobrecargado con otros artefactos ya que el producto podría no funcionar correctamente.

14 • La parte posterior del horno debe colocarse, como mínimo, a 20 cm de distancia de la pared.

15 • Conecte su horno en un tomacorriente de 220 voltios con conexión a tierra. El tomacorriente deberá ser de 15 amperios o superior.

16 • Verifique que la tensión de la cadena sea la correcta, deberá estar tensionada de tal forma que no se salga, pero tampoco que fuerce al motor.

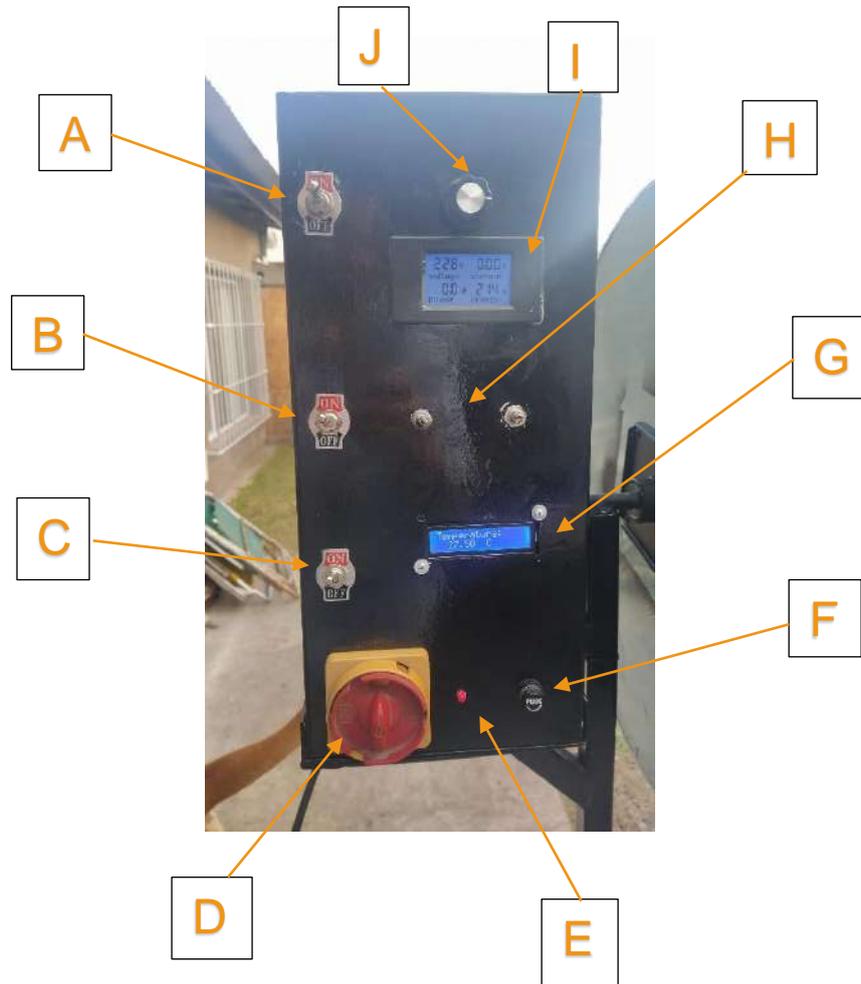
3-Conoza el HORNO IR

Horno



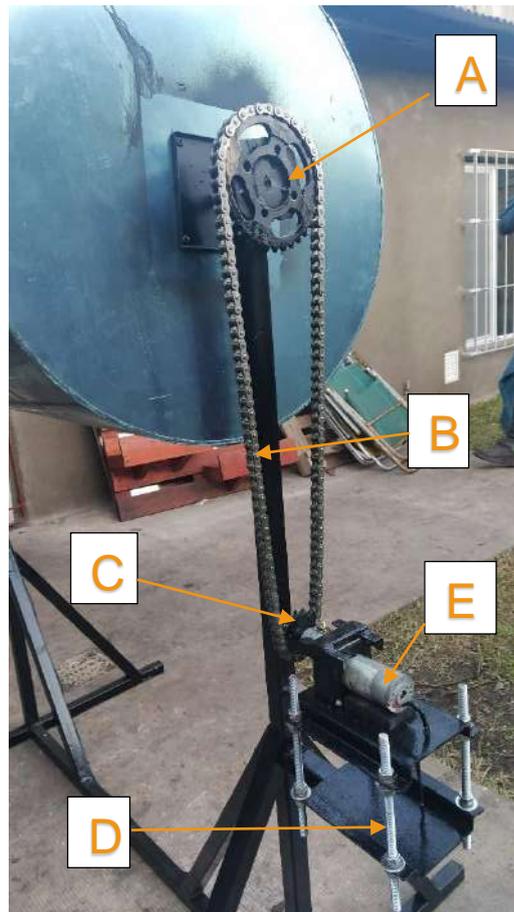
- A- Gabinete de control.
- B- Cilindro rotatorio.
- C- Sistema de rotación.
- D- Estructura de soporte.

Gabinete



- A- On/Off Sistema de la lámpara.
- B- On/Off Sistema de rotación.
- C- On/Off Sistema de medición de temperatura.
- D- On/Off General.
- E- Led de prendido.
- F- Fusible externo (15 A).
- G- Pantalla de muestro de temperatura.
- H- Potenciómetros que regulan RPM.
- I- Pantalla datas lámpara.
- J- Regulador potencia lámpara.

Sistema de rotación

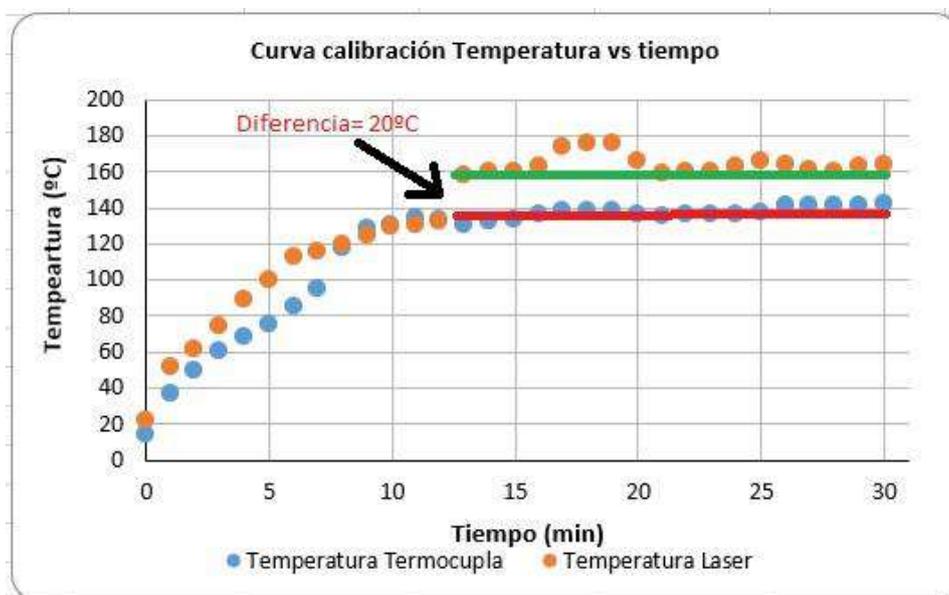


- A- Corona
- B- Cadena
- C- Piñón
- D- Sistema de tensionado de cadena
- E- Motor

4-Modo de uso

- 1- Enchufe el horno en un toma corriente.
- 2- Abra la tapa de cierre de forma corrediza y cargue el material a secar (no cargar mucha cantidad para no forzar innecesariamente el motor). Cierre la tapa.
- 3- Diríjase al panel de control principal. Prenda el On/off general (D).
- 4- Verifique que el led de prendido esté funcionando (E).

- 5- Prenda los On/Off de cada parte del horno. (A) (B) (C).
- 6- Verifique la potencia deseada en la pantalla (I) la lámpara funciona de los 250-2000 w, pero esto puede variar según la tensión que halla en la red eléctrica. Dicha potencia la puede variar con el potenciómetro (J).
- 7- Regule la velocidad de rotación según los RPM deseados, con los potenciómetros (H) el de la izquierda hace una regulación más gruesa que el de la derecha. Se recomienda ajustar el grueso y luego el fino.
- 8- Controle la temperatura dentro del horno a partir del dato arrojado en la pantalla (G). Recuerde que deberá realizar una curva de calibración dependiendo del material a secar. A modo de ejemplo le mostramos la curva de calibración para el PET. Deberá utilizar una pistola laser apuntando la superficie del material. Esto hágalo con el horno sin rotar y con la tapa apenas abierta para que tenga lugar para utilizar dicha pistola.



- 9- Una vez que realice el secado al tiempo requerido, apague la lámpara (A), luego apague el sistema de rotación (B) y por último la medición de temperatura (C).
- 10- Abra la tapa corrediza con cuidado ya que la misma estará caliente. Se recomienda usar guantes que soporten alta temperatura.
- 11- Prenda el sistema de rotación (B) y coloque una bandeja abajo, cuando el sector de la tapa pase por debajo, el material secado caerá.
- 12- Una vez finalizada su utilización, espere a que se enfríe. Apague todos los controles y desconecte el enchufe.

CAPÍTULO 4

PROCESO DE RECICLADO

4.1. INTRODUCCIÓN

En el siguiente capítulo se detallan las actividades que se realizaron en el marco del reciclado de las botellas de PET. Este ciclo incluyó distintas etapas, a saber: recolección manual, trituración, limpieza, secado y conformado de placas mediante moldeo por compresión. Las dos primeras etapas del ciclo se realizaron en una planta de reciclaje, experiencia que sirvió para comprender y profundizar el conocimiento de cómo es el funcionamiento de una recicladora a escala real. La etapa de lavado se siguió según los lineamientos habituales en la industria del reciclado de plástico. La etapa de secado, al ser la controlante del tiempo del ciclo de reciclado y también de las propiedades finales del PET reciclado, fue elegida como tema de investigación de este trabajo final. Para explorar distintos métodos de secado se implementó el uso del horno infrarrojo construido por nosotros y un secado en un horno convencional a modo comparativo. Finalmente se conformaron placas mediante moldeo por compresión.

4.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.2.1. OBTENCIÓN DE ESCAMAS DE PET RECICLADO

Se recolectaron manualmente envases de gaseosas de la marca Seven Up en una planta de reciclado que funciona como cooperativa en la localidad de Pinamar, provincia de Buenos Aires. Dicha recicladora llamada "Reciclando Conciencia" recibe todo tipo de desechos urbanos tales como plásticos, latas, papel, cartón, envases tipo tetra brik, vidrio, chatarra, metales, residuos de aparatos electrónicos y eléctricos, neumáticos. Estos residuos son depositados por los vecinos en las islas ambientales y son recolectados y transportados por un servicio de recolección privada contratada por la municipalidad de Pinamar. Luego en la cooperativa son separados de forma manual en 24 tipos diferentes de materiales. Parte de los residuos son enfardados y transportados hasta las diferentes industrias en forma de *commodities*, las cuales se encargan de su reciclado. El resto de los residuos son triturados y puestos como agregados en diferentes productos, como placas y bloques de poliestireno expandido, lo que permite minimizar el volumen de residuos dispuestos en basurales a cielo abierto. En la **Figura 4-1**, se muestran los productos realizados por la empresa anteriormente mencionada.



Figura 4-1. Productos realizados por Reciclando Conciencia.

Como se expresó en la introducción, las botellas coloreadas contienen contaminantes adicionales (metales pesados) presentes en los pigmentos utilizados para su coloración. Es por eso que este tipo de envase tendría que tener una mayor prioridad para ser reciclado que aquellos transparentes y por ese motivo es que se decidió utilizarlos en el presente proyecto final. Se recolectaron botellas manualmente de una preselección de residuos plásticos clasificados por color por la cooperativa. Luego, se separaron manualmente las tapas y etiquetas de las mismas, como vemos en la **Figura 4-2**, y se procedió a triturarlas con el uso de una máquina trituradora de botellas, **Figura 4-3**. Antes de triturar se efectuó una limpieza de la maquinaria para garantizar que no haya trazas de otros materiales que puedan resultar contaminantes.



Figura 4-2 Botellas acondicionadas para el triturado posterior.



Figura 4-3. Trituradora de botellas de PET.

4.2.2. LAVADO

Las escamas de botellas de PET obtenidas en la cooperativa se sometieron a un proceso de lavado de tipo industrial típico para esta clase de residuos. El líquido de limpieza se realizó a partir de una mezcla de 40 gramos de hidróxido de sodio (soda cáustica) y dos litros de agua destilada, de modo de obtener una concentración de 20 g/litro. A dicha mezcla se le agregó 5ml de un detergente tensioactivo, que es un tipo de detergente que asegura no dejar residuos sobre las escamas. Mediante el uso de un agitador mecánico se logró una mezcla homogénea, y luego se agregaron las escamas de PET obtenidas en el proceso anteriormente mencionado (500g aproximadamente) como se observa en la **Figura 4-4**.



Figura 4-4 Lavado del rPET

La limpieza con agitador mecánico se realizó por 20 minutos controlando la velocidad del agitador para no generar espuma en la mezcla debido al tensioactivo. Al finalizar la limpieza fue necesario separar el PET de algunos residuos provenientes de las etiquetas, tapas, etc. Para ello se utilizó un proceso de flotación/decantación agregando agua al recipiente donde se realizó el lavado, logrando la separación y posterior eliminación de los restos no deseados, ya que tanto el material de las etiquetas como el de las tapas son de menor densidad que el PET y flotan en agua, como se puede apreciar en la **Figura 4-5**.



Figura 4-5. Proceso de decantación

Posteriormente se eliminaron los restos de soda cáustica lavando las escamas con agua de canilla controlando el pH hasta llegar al equilibrio. Por último, se realizó un lavado extra con agua destilada para eliminar todas las posibles impurezas presentes en el agua de canilla.

4.2.3. SECADO

Como se adelantó en los capítulos anteriores, el secado resulta una etapa fundamental en el reciclado del PET. Para optimizar esta etapa se estudiaron dos métodos de secado, en estufa convencional y en horno IR. El secado se realizó entre 165 °C y 175 °C para garantizar la cristalización del PET, siendo esta una condición que favorece la no absorción extra de humedad una vez que el secado finalizó. ^[12] Para ambos métodos se construyeron curvas de porcentaje de humedad perdida vs tiempo isotérmicas (a la temperatura de secado), para obtener el tiempo umbral por encima del cual la humedad de la muestra no varía.

4.2.3.1 ESTUFA

Se evaluaron 36 muestras diferentes de entre 1,8 a 2,5 gramos de material cada una, en estufa convencional a 170°C, como se puede ver en la **Figura 4-6**.



Figura 4-6. Muestras colocadas en el horno

Se retiraron y pesaron 3 muestras distintas cada 15 minutos para obtener el promedio de pérdida de agua para cada tiempo. Se calculó el porcentaje de humedad perdida siguiendo la **Ecuación 4-1**.

$$\%L = \frac{(m_{total} - m_{seca})}{m_{muestra}} * 100 \quad \text{Ecuación 4-1}$$

donde m_{total} corresponde al peso de la muestra más el porta muestra inicial, m_{seca} al peso de la muestra junto con el portamuestra a la salida del horno, $m_{muestra}$ al peso de la muestra inicial y %L es el peso perdido por la muestra en agua.

El tiempo final del ensayo fue de 345 minutos, obteniéndose así una cantidad de 12 puntos. Con los valores determinados de humedad perdida se graficó una curva de porcentaje de humedad perdida vs tiempo de secado tanto para el PET virgen como para el PET reciclado, obteniéndose las gráficas que vemos en la **Figura 4-7**.

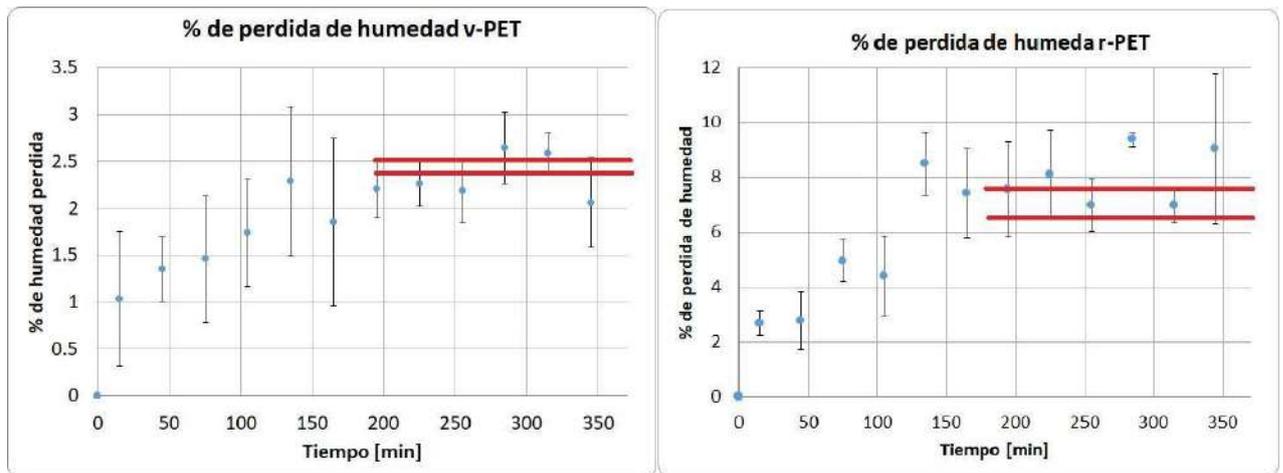


Figura 4-7. Porcentaje de pérdida de humedad vs tiempo para vPET Y rPET en estufa.

Se determinó que el tiempo de secado es de 180 minutos tanto para vPET y el rPET como se observa en la **Figura 4-6**. A partir de ese tiempo el valor de porcentaje de humedad perdida se vuelve constante, no presenta un cambio significativo que justifique un secado de mayor duración, esto es coherente con la bibliografía existente ya que a partir de las 3-4 horas de secado se mantiene constante hasta tiempos mayores ^[27].

Es importante destacar que el porcentaje de humedad perdido en el material virgen oscila entre 1,9-2,3, mientras que para el reciclado oscila entre 6,2-8,8. Esto pudo deberse a que el material reciclado fue expuesto a un líquido (en este caso, gaseosa Seven-up) por un periodo prolongado de tiempo en el curso de su uso como contenedor de fluidos, además de haber sido sometido a un lavado industrial intensivo.

4.2.3.2 HORNO IR

El secado en horno IR fue realizado a una temperatura de entre 165 °C y 175 °C, mediante una lámpara IR, con una potencia de 1900 Watts. Las curvas de porcentaje de humedad perdida fueron realizadas de manera análoga al proceso de secado en horno convencional. Los resultados obtenidos se muestran en la **Figura 4-8**.

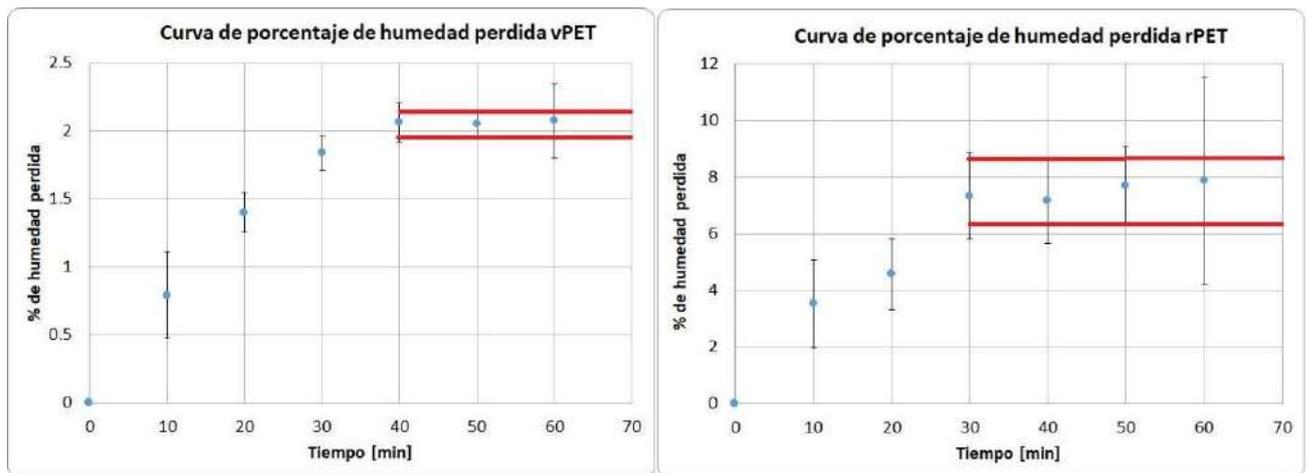


Figura 4-8 Porcentaje de pérdida de humedad vs tiempo para vPET Y rPET en estufa.

Para el secado en horno IR se observó que la velocidad de extracción de agua se dio en menor tiempo que en el horno convencional, obteniendo una estabilidad en el valor de humedad a los 40 minutos, lo que representa una reducción del tiempo de secado de un 450%. Esto es importante ya que conlleva una disminución en los tiempos del proceso, influyendo positivamente en los costos de reciclado. Aunque se observó que para el material reciclado el porcentaje de pérdida de humedad se mantiene estable a partir de los 30 minutos, se decidió utilizar un tiempo de secado en horno IR de 40 minutos en ambos materiales – PET virgen y PET reciclado – a modo comparativo.

Comparando los dos gráficos, tanto para el vPET como para el rPET, se puede observar que se obtiene la misma pérdida de humedad en ambas técnicas de secado.

En ambos tipos de secado se observó que el material reciclado posee mayor cantidad de agua, lo cual puede deberse a que los sucesivos ciclos de conformado que sufrió el material modificaron su permeabilidad, aumentandola. Al ser más permeable absorbe mayor cantidad de agua y la diferencia de humedad retenida mostrada en los ensayos no es sólo por estar en contacto con un líquido previamente. Por ende, al poseer mayor cantidad de agua el gradiente de masa es mayor y por lo tanto la velocidad de extracción aumenta, lo cual es lo observado en los ensayos.

4.2.4. CONFORMADO

Se conformaron placas de ambos materiales (PET virgen y reciclado) secados mediante estufa convencional e IR. El procesamiento se llevó a cabo en una prensa hidráulica marca E.M.S, se observa en la **Figura 4-9**. La geometría de las placas se eligió pensando en que sean utilizadas para fabricar productos por termoformado, como bandejas, platos, etc. En este procesamiento los espesores usados son de 1 mm aproximadamente, y se termoforman a una temperatura que varía entre 80°C y 110°C. [12]



Figura 4-9. Prensa hidráulica

Se utilizó una presión de 45 Kg/ cm^2 , en un molde rectangular de 15x20 cm con un espesor de 1 mm. Tomando la densidad del vPET como 1.38 g/ cm^3 y sumando un 30% más del material debido a la pérdida de humedad durante el secado, se obtuvo un peso de 60 gramos para realizar cada placa. Teniendo en cuenta que las gráficas de pérdida de humedad del material reciclado dieron una mayor pérdida de humedad, para realizar estas placas se usó una mayor cantidad de material, 65 gramos.

En primera instancia se hicieron pruebas preliminares a diferentes temperaturas hasta obtener una placa con una distribución homogénea del material y garantizar el fundido del mismo, obteniéndose 285 °C como temperatura óptima de procesamiento. Se utilizó un tiempo total de prensado de 28 minutos, los primeros 10 minutos sin aplicar presión y el resto aplicando una presión de 45 Kg/ cm^2 , definiendo estas condiciones a partir de los

procedimientos exploratorios. Luego la placa fue enfriada hasta los 65 °C antes de extraerla del molde para garantizar estar por debajo de la Tg del material. Dicho enfriamiento fue realizado por sistema de refrigeración líquida incorporado en la prensa que consiste en el pasaje de agua fría a través de las placas donde están contenidas las resistencias

Cabe destacar que, como era de esperar, no se pudieron obtener placas de material sin secar debido a que se rompían al sacarlas del molde y presentaban fisuras de gran tamaño o en el caso de obtener un fragmento, este presentaba gran fragilidad al momento de extraer y maquinar probetas con diferentes tipos de sierra. Esto confirma la idea antes enunciada de que la presencia de agua en el seno del PET junto con las altas temperaturas de conformado genera procesos hidrolíticos que deterioran fuertemente las propiedades mecánicas de las piezas obtenidas. La **Figura 4-10** y la **Figura 4-11** muestran fotos de ambos materiales conformados sin secar y secados al momento de extraer las placas del molde.

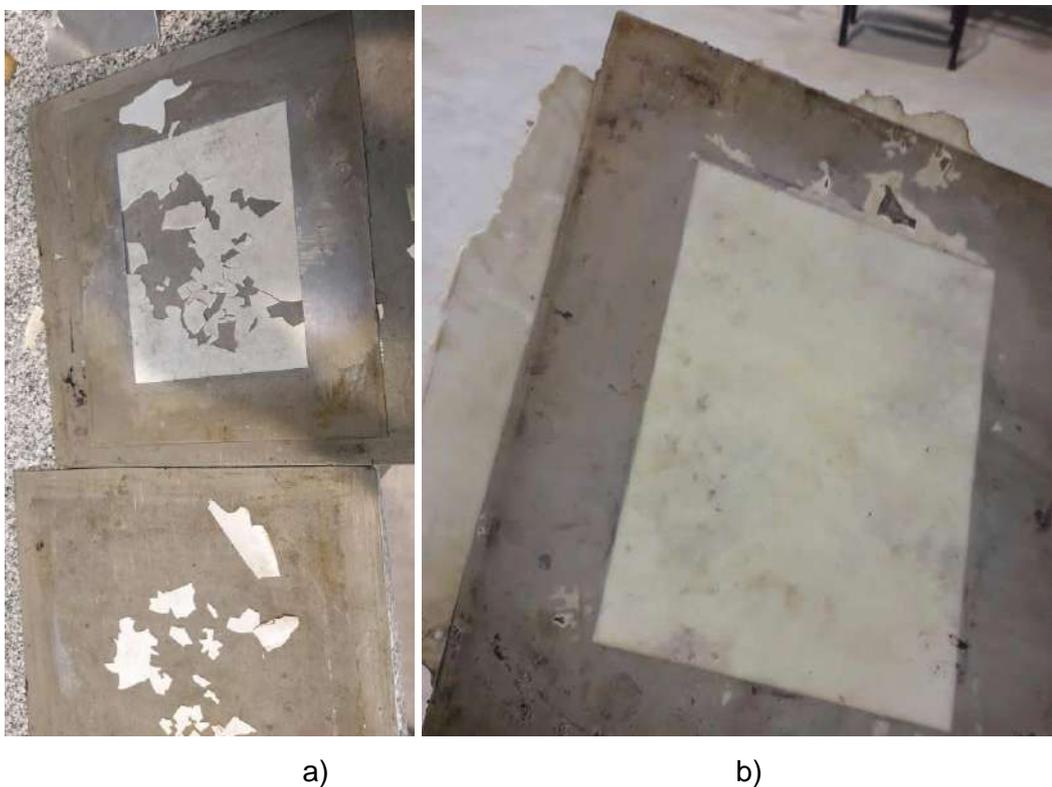
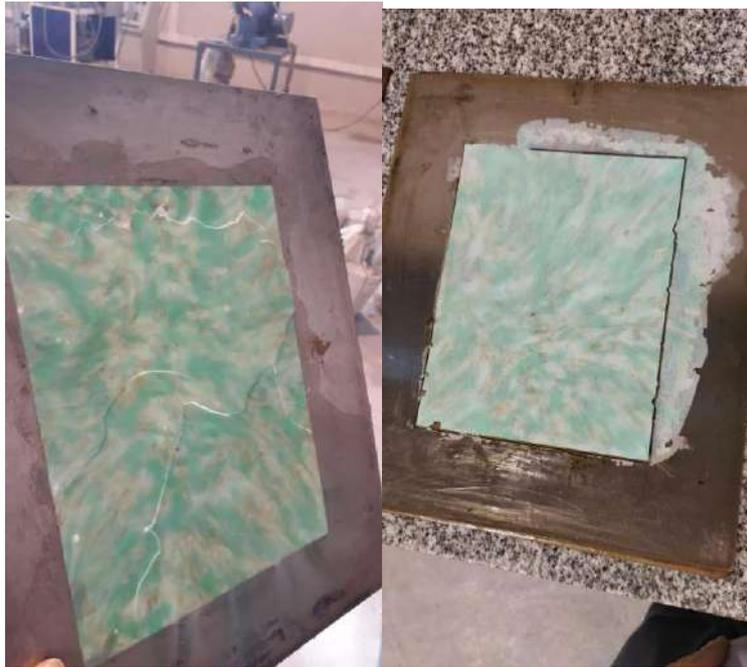


Figura 4-10. Placa de vPET. a) Sin secar. B) Secada IR



a)

b)

Figura 4-11. Placa de rPET. a) Sin secar b) Secada Estufa

Se puede ver en la **Figura 4-11 a)** un comportamiento similar que en el la **Figura 4-10 a)**, en donde las placas sin secar presentan fisuras.

Sin embargo, en la figura **Figura 4-11 b)** en el rPET secado se obtuvieron los mismos resultados que en el vPET secado siendo posible desmoldar dichas piezas y ser cortadas para futuros ensayos.

Por otro lado, la **Figura 4-12.** muestra una comparación de dos placas de material virgen secadas mediante los dos métodos utilizados. Se puede observar un leve cambio de color entre ambas placas, esto puede deberse a varios motivos, como, por ejemplo: degradación de la superficie, cambio en el largo de cadenas poliméricas, etc.



Figura 4-12. Placas de material virgen secadas por IR y por Estufa

4.3. CONCLUSIONES

A lo largo de este capítulo se comprendió la importancia de cada etapa del ciclo de reciclado, en especial la etapa de secado, ya que sin la misma no se pueden obtener piezas enteras.

Si bien el secado en estufa es el más utilizado industrialmente, con el secado en IR se obtuvo un porcentaje de pérdida de humedad igual reduciendo 5 veces el tiempo que tarda esta etapa. Es importante resaltar que reducir en tal magnitud el tiempo de secado disminuye los costos de producción de manera significativa, logrando así un aumento en los márgenes de beneficio. Otro aspecto que es necesario resaltar es que las industrias al acortar su ciclo de producción necesitan de un menor inventario de materias primas, pudiendo reducir el espacio en donde se hace el acopio de las mismas. En la actualidad el tiempo es un parámetro muy importante a nivel industrial. De hecho, se desarrollan estudios en donde se determina el tiempo de cada proceso para evitar la presencia de un porcentaje alto de improductividad – que afecta la eficiencia del trabajo que se realiza – con la finalidad de aprovechar todos los recursos posibles. Por lo tanto, hacer una reducción en el tiempo de producción resulta altamente positivo para cualquier tipo de industria.

Por otro lado, se tuvo la oportunidad de ir a una planta de reciclado real pudiendo así ver cada etapa en primera persona. Pudimos observar como a partir del reciclado, alargan la vida útil de materiales de desecho mediante procesos de recuperación y/o reciclado. De esta forma se colabora con la preservación del medio ambiente, al reducirse la generación de nuevos residuos, evitando el agotamiento de las materias primas que nos brinda la naturaleza, que son finitas.

CAPÍTULO 5

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LAS PLACAS OBTENIDAS

5.1. INTRODUCCIÓN

Una de las conclusiones más importante del capítulo anterior es que se logra reducir hasta casi 5 veces el tiempo de secado mediante el uso de la tecnología IR. Es por ello que resulta necesario examinar si dicha técnica de secado modifica de alguna forma la estructura de los materiales, comprometiendo su desempeño mecánico. El objetivo de este capítulo es entonces analizar las propiedades morfológicas, térmicas y mecánicas de muestras sometidas a ambos tipos de secado, con el fin de estudiar el efecto del secado IR.

5.2. MATERIALES

Se obtuvo PET reciclado a partir de botellas de gaseosa Seven-up post-consumo siguiendo las etapas de reciclado descritas en el capítulo 3.

A fines comparativos se utilizó material virgen PET Laser+® AD650 que fue proporcionado por Ampacet Latin América en forma de pellets el cual es utilizado comúnmente para producción de botellas de plástico. Las principales propiedades de catálogo del PET virgen se muestran en la **Tabla 5-1**.

Tabla 5-1. Propiedades de catálogo de la resina PET.

Propiedad	Método de ensayo	Valor
Densidad cristalina	D 1505	1.4 g/cm ³
Pico de punto de Fusión cristalino	D 3418	241 °C
Calor de fusión	E 793	58 kJ/kg
Tamaño de Pellet	-	2.5 mm
Forma de Pellet	-	Cúbico

En la **Tabla 5-2** puede verse la nomenclatura asignada a los materiales utilizados según la etapa del proceso y el tipo de secado.

Tabla 5-2 Nomenclatura de las muestras a analizar.

Nombre de la muestra	Tipo de material	Tipo de secado	Etapas del proceso
$vPET_{SS}$	Virgen	-	sin secar
$vPET - E_{SC}$	Virgen	Estufa	secado sin conformar
$vPET - E_C$	Virgen	Estufa	conformado
$vPET - IR_{SC}$	Virgen	Infrarrojo	secado sin conformar
$vPET - IR_C$	Virgen	Infrarrojo	conformado
$rPET_{SS}$	Reciclado	-	sin secar
$rPET - E_{SC}$	Reciclado	Estufa	secado sin conformar
$rPET - E_C$	Reciclado	Estufa	conformado
$rPET - IR_{SC}$	Reciclado	Infrarrojo	secado sin conformar
$rPET - IR_C$	Reciclado	Infrarrojo	conformado

5.3. MÉTODOS EXPERIMENTALES DE CARACTERIZACIÓN

5.3.1. ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

La espectrofotometría infrarroja es un método de medida de la absorción de la radiación en un rango de longitudes de onda, cuando ésta pasa a través de una capa delgada de sustancia. La espectrofotometría de infrarrojo es un ensayo de identificación por excelencia siendo capaz de distinguir sustancias con diferencias estructurales. De las tres regiones de infrarrojo (cercano, medio y lejano), la región comprendida entre 4000 a 400 cm^{-1} es la más empleada para fines de identificación. Sin embargo, en algunos casos es utilizado con fines cuantitativos. El espectro de infrarrojo (IR) es único para cualquier compuesto químico con excepción de los isómeros ópticos que tienen espectros idénticos. En algunas ocasiones, el polimorfismo puede ser responsable de diferencias en el espectro IR de un compuesto en estado sólido.

5.3.2. FTIR-ATR

La espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) implica la interacción de la radiación infrarroja con la materia. Las moléculas absorben las frecuencias que son características de su estructura al hacer pasar un haz de luz infrarroja a través de ellas. La porción infrarroja del espectro electromagnético se divide generalmente en tres regiones; el infrarrojo cercano, medio y lejano, denominado así por su relación con el espectro visible. El infrarrojo medio, aproximadamente entre $000 - 400 \text{ cm}^{-1}$, se puede utilizar para estudiar las vibraciones fundamentales y la estructura rotacional-vibratoria asociada. La espectroscopia IR se usa a menudo para identificar estructuras porque los grupos funcionales dan lugar a bandas características tanto en términos de intensidad como de posición (frecuencia). Además, permite analizar la estructura a través de la interacción de las moléculas a nivel de grupo funcional y es utilizada para analizar las estructuras cristalinas y amorfas de ciertos polímeros. Una forma no destructiva de analizar muestras sólidas es mediante el método de espectroscopía de reflexión total atenuada (ATR, *Attenuated Total Reflection*). El sustrato a analizar se presiona en contacto íntimo con un prisma de material óptico denso, que es transparente sobre el rango de longitudes de onda IR estudiar. El haz IR incide en la superficie del prisma, produciéndose una reflexión interna múltiple, y la superficie de la muestra absorbe parte de la radiación a frecuencias características.

Las muestras estudiadas a lo largo de este trabajo fueron caracterizadas mediante espectroscopia FTIR-ATR utilizando un espectrofotómetro IR de la marca Perkin Elmer y el modelo es Spectrum 3 en la empresa que colaboró con el proyecto (Ampacet). Se utilizó la prensa hidráulica Carver, modelo 4122. Los espectros se obtuvieron en el rango de $4400 - 350 \text{ cm}^{-1}$, a temperatura ambiente ($23 \pm 2^\circ\text{C}$). Luego las mismas muestras fueron analizadas con los mismos instrumentos por FTIR. Los espectros se obtuvieron en el rango de $3400 - 550 \text{ cm}^{-1}$ para este caso. Dichas técnicas se llevaron a cabo para verificar si la estructura química del PET se ve modificada por el método de secado y el proceso de reciclado.

5.3.3. CARACTERIZACIÓN TÉRMICA

La caracterización térmica de los materiales se realizó por calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en inglés *Differential Scanning Calorimetry*). Es una técnica experimental que permite registrar los cambios de energía (eventos exo/endo térmicos) que experimenta

una muestra de material en relación a una muestra de referencia inerte sometidas a un programa de calentamiento/enfriamiento controlado. Dichos cambios de energía están asociados a eventos térmicos (como transiciones de primer o segundo orden) que experimenta la muestra en función de la temperatura.

En el presente proyecto final se utilizó DSC para estudiar y determinar diversas propiedades térmicas de los materiales involucrados, a saber: temperaturas de cristalización (T_c) y de fusión (T_m), entalpías de cristalización (ΔH_c) y de fusión (ΔH_m), y grado de cristalinidad (X_c). El equipo utilizado en el presente trabajo fue un DSC TA instruments modelo Q2000 (Laboratorio de materiales compuestos termoplásticos, INTEMA, Mar del Plata, Argentina). El programa de temperatura aplicado para el análisis de DSC de todos los materiales consistió en tres pasos: un primer calentamiento desde 20°C hasta 300°C a una velocidad de 10°C.min⁻¹. Luego se realizó un enfriamiento hasta 20°C, a 30°C.min⁻¹. Finalmente, se llevó a cabo un segundo ciclo de calentamiento para borrar la historia térmica desde 30°C hasta 300°C a 10°C.min⁻¹.

A partir del análisis de las endotermas de fusión se determinó el grado de cristalinidad para las muestras. Los calores de fusión (ΔH) fueron normalizados en función de la cantidad de polímero presente en cada muestra. La cristalinidad se determinó mediante la ecuación:

$$X_c(\%) = \frac{\Delta H}{\Delta H^*} \cdot 100 \quad [\text{Ecuación 5.1}]$$

En donde ΔH^* corresponde al calor de fusión de equilibrio asociado a un cristal perfecto (100% cristalino). Las demás propiedades fueron obtenidas de los gráficos usando el programa Advantage.

Se realizaron ensayos preliminares para comprobar que el material obtenido de las botellas era efectivamente PET. Además, este ensayo se llevó a cabo para los cuatro tipos de muestras extraídas de las placas conformadas, también para muestras sin secar de ambos materiales y antes del conformado de las placas.

5.3.4. COMPORTAMIENTO REOLÓGICO

Se realizó una estimación del comportamiento reológico mediante un ensayo de índice de fluidez (*melt flow index*). Se mide la cantidad de material (medido en gramos) que fluye a través del orificio de un capilar en 10 minutos, manteniendo constantes presión y temperatura estándares que dependen del tipo de material a ensayar.

Dicha técnica se llevó a cabo para estimar la viscosidad y su relación con la degradación de forma comparativa entre el vPET y el rPET por ambos métodos de secado.

El ensayo se llevó a cabo siguiendo la norma D 1238-4, en un equipo de la marca Instron, modelo MF10 (Laboratorio de Compuestos Termoplásticos, INTEMA, Mar del Plata, Argentina). Las condiciones de ensayo utilizadas fueron peso de 2.16 Kg y temperatura de 250 °C.

5.3.5. COMPORTAMIENTO MECÁNICO

Mediante ensayos mecánicos de tracción uniaxial en cámara a alta temperatura y flexión en 3 puntos se estudió el comportamiento mecánico de los materiales.

El estudio del comportamiento en tracción uniaxial se llevó a cabo con el dinamómetro INSTRON EMIC Modelo 23-50 (Laboratorio de Compuestos Termoplásticos, INTEMA, Mar del Plata, Argentina). Los ensayos se realizaron siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D 638. Se emplearon probetas tipo V, extraídas de las placas moldeadas por compresión de 1 mm (espesor de placas que sirven para ser moldeadas por termoformado) tanto para PET virgen como reciclado, ambos sometidos a los dos tipos de secado mencionados anteriormente. Las probetas se ensayaron a una velocidad de travesa de 10 mm/min a 100 °C. La temperatura de ensayo fue elegida teniendo en cuenta la temperatura a la cual placas análogas suelen ser conformadas mediante termoformado^[12]. El fin de este ensayo es evaluar las propiedades mecánicas de los materiales emulando las condiciones termo-mecánicas a las que son sometidos durante su procesamiento. De esta forma es posible comparar y evaluar si el material reciclado podría ser apto para ser procesado mediante termoformado.

Se utilizaron un mínimo de 5 probetas y se midieron las dimensiones de cada una en al menos tres puntos antes de cada ensayo.

A partir de los registros fuerza-desplazamiento (F-d) se calcularon las curvas tensión-deformación (σ - ϵ). A partir de dichas curvas se determinaron la tensión de fluencia (σ_f) y el módulo de Young (E). La tensión de fluencia (σ_f) de un material se define como aquella en la que se produce una deformación irreversible, no recuperable, y en este estudio se estimó

dicho parámetro a partir de la intersección de una recta paralela a la pendiente inicial de la curva desplazada al 0.2% de deformación.

El comportamiento en flexión se llevó a cabo con el mismo dinamómetro INSTRON utilizado para el ensayo en tracción. El módulo en flexión (módulo tangente de elasticidad) se determinó de acuerdo con la norma ASTM D 790-3 a una velocidad de travesa de 1.8 mm/min. Se ensayaron al menos cinco muestras de 51x13x1 mm de cada placa. El módulo tangente de elasticidad, usualmente llamado “módulo de elasticidad”, es la relación, dentro del límite elástico, entre la tensión y la deformación. Se calcula dibujando una tangente a la porción inicial de la curva carga-deformación y utilizando la siguiente ecuación:

$$E_b = \frac{L^3 \cdot m}{4 \cdot b \cdot d^3} \quad [\text{Ecuación 5.2}]$$

Donde E_b es el módulo de elasticidad en flexión, L la longitud entre soportes (span), b el ancho de la probeta, d el espesor de la probeta y m la pendiente de la recta tangente a la porción lineal de la curva carga-desplazamiento.

5.3.6. COMPORTAMIENTO A LA FRACTURA

El comportamiento a la fractura resulta una determinación más realista que sólo una determinación en tracción o flexión que son ensayos más bien comparativos. El complejo estado de tensiones al que es sometida la probeta durante un ensayo de fractura refleja mejor el estado tensional al que los productos están sometidos en la vida cotidiana, por eso resulta un buen método para estimar la performance de un material de una manera más profunda. La determinación de la tenacidad a la fractura en base a la teoría de la Mecánica de Fractura ofrece un fundamento sólido sobre el cual guiar el desempeño de nuevos materiales, y en este caso, poliméricos. Esto se debe a que, a diferencia de los ensayos convencionales, los parámetros críticos de fractura basados en esta teoría, logran separar la propiedad intrínseca del material de los efectos debidos a la geometría del ensayo. La premisa básica de la Mecánica de Fractura es la existencia de fisuras o defectos en el material. [27]

La presencia de estos defectos es muy común en los materiales poliméricos (microhuecos, partículas extrañas, líneas de soldadura), por ello se justifica el uso de la Mecánica de Fractura para la evaluación de la tenacidad del PET estudiado en este trabajo final. La Mecánica de Fractura Lineal Elástica (LEFM, *Linear Elastic Fracture Mechanics*) caracteriza la resistencia al crecimiento de fisuras de materiales que tienen un comportamiento lineal

elástico y que generalmente exhiben fractura frágil. Los criterios de fractura de la LEFM se basan, o bien en el campo tensional generado en el vértice de una fisura (factor de intensidad de tensiones o “tenacidad”, K_I), o en la liberación de energía durante el crecimiento de la fisura (tasa de liberación de energía o energía de fractura, G_c).

Para materiales que no conservan una relación lineal entre tensiones y deformaciones, la LEFM pierde validez y se deben utilizar otros conceptos alternativos para determinar un parámetro de fractura que describa la respuesta del material. Entre estos parámetros, los que se emplean con mayor frecuencia son la Integral-J y el CTOD, basados en los principios de la Mecánica de Fractura Elástico-Plástica (EPFM, *Elastic Plastic Fracture Mechanics*). Estos parámetros son adecuados cuando el material exhibe un comportamiento no lineal debido al desarrollo de plasticidad confinada en el vértice de la fisura o a la propagación inicialmente estable de la fisura. Las etapas involucradas en el proceso de fractura de un material elástico no lineal comprenden, en general, el redondeo del vértice, la iniciación, el crecimiento estable y la propagación inestable de la fisura.

La LEFM y la EPFM se emplean para la caracterización de materiales frágiles o que desarrollan un nivel de plasticidad en la punta de la entalla limitada. Sin embargo, para materiales que presentan una gran ductilidad y en los que se produce fluencia completa del material antes de que la grieta empiece a propagarse, no es posible aplicar las teorías anteriormente descritas. La teoría que permite evaluar la resistencia a la fractura de estos materiales es la Mecánica de Fractura Post-fluencia (PYFM, *Post Yield Fracture Mechanics*). La **Figura 4-1** esquematiza las diferentes metodologías que deben emplearse según el comportamiento a la fractura que presente el material. ^[28]

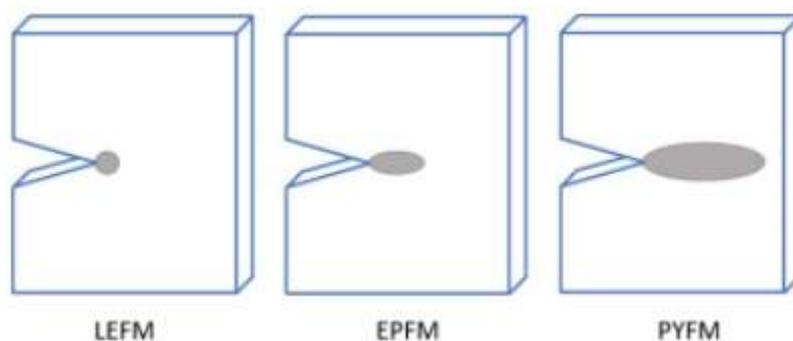


Figura 5-1. Metodología apropiada según el comportamiento a la fractura del material.

El campo de tensiones generado alrededor del vértice de una fisura depende del modo particular de apertura de la misma (**Figura 5-2**). Existen tres modos y se representan con los

números romanos: I (cuando la apertura es perpendicular al plano de la fisura), II (cuando es por corte paralelo al plano de la fisura), y III (cuando está fuera del plano).^[29] Una fisura puede crecer bajo alguno de estos tres estados tensionales o bajo cualquier otro que sea combinación de ellos. El Modo I de apertura es el que se utiliza en el diseño ingenieril ya que es la sollicitación más rigurosa, y bajo la que se cree ocurre la fractura de piezas en servicio. Por lo tanto, los parámetros críticos de fractura suelen llamarse G_{Ic} , K_{Ic} , J_{Ic} (para indicar que se determinaron en modo I).

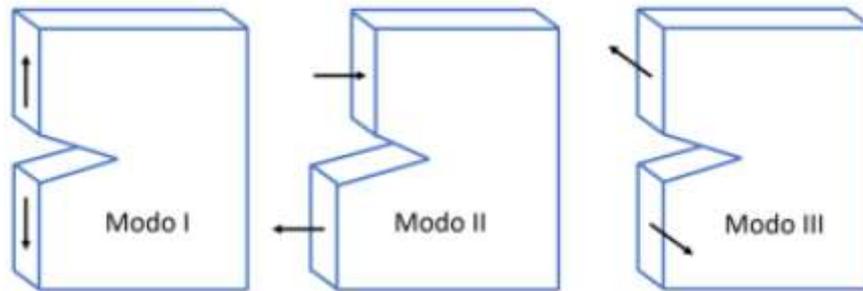


Figura 5-2. Modos de apertura de una fisura

En el presente proyecto final se realizaron ensayos, bajo el modo I de fractura en un dinamómetro INSTRON 4467 (Laboratorio de Ciencia e Ingeniería de Polímeros, INTEMA, Argentina) a temperatura ambiente ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) a una velocidad de desplazamiento de la travesa de 1 mm/min. Para la caracterización a fractura se utilizaron probetas con doble entalla tipo DDENT (*deep double edge notched tensile*), tal como se esquematiza en la **Figura 5-3**, de 80 mm x 40 mm x 1 mm. La zona de agarre de las probetas DDENT fue de 15 mm para cada mordaza y las longitudes de ligamento variaron entre 4 y 16 mm para las probetas de material PET virgen y de 20 mm para las probetas de material PET reciclado.

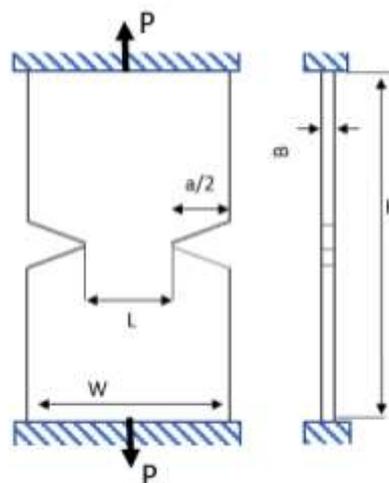


Figura 5-3. Geometrías de las probetas utilizadas en ensayos de fractura.

En todos los casos, las entallas se maquinaron con una cuchilla aguda (radio del vértice menor a 12 μm) utilizando una máquina Ceast Notchvis junto con un sistema de placas que sostiene la probeta diseñada de manera que permite una alineación perfecta entre las entallas.

Para los ensayos exploratorios, se utilizó una relación entre la longitud de la entalla (a) y el ancho de la probeta (W) de $a/W=0.5$, los cuales fueron usados para la elección de la metodología de fractura a aplicar en cada material. El material reciclado presentó un comportamiento semi dúctil y el material virgen un comportamiento de post-fluencia. De acuerdo a estos hallazgos se utilizaron dos metodologías de la Mecánica de fractura, explicadas a continuación.

5.3.6.1. RÉGIMEN SEMI-DÚCTIL

En este régimen la fractura inestable suele estar precedida por cierta cantidad de flujo plástico. Si bien no existe una metodología normalizada, se han propuesto algunas modificaciones a los métodos basados en la LEFM y también se han utilizado metodologías basadas en EPFM para evaluar la resistencia a la fractura: el método de la energía equivalente y el método de la Integral-J.^[29] El valor de la Integral-J en la inestabilidad, basado en los principios de la EPFM, se utilizó para evaluar la tenacidad de los materiales que presentaron curvas carga- desplazamiento con una brusca caída de carga en el punto de fractura, es decir, un comportamiento de falla cuasi-frágil. Bajo régimen de comportamiento elástico no lineal y para probetas DDENT con entallas profundas ($a/W=0.5$), J_c puede evaluarse a través de la **Ecuación 5.3** en el punto de inestabilidad de carga:

$$J_c = \frac{\eta U_{tot}}{B(W-a)} \quad \text{[Ecuación 5.3]}$$

Donde U_{tot} es la energía de fractura hasta ese punto de inestabilidad, es decir, el área bajo la curva carga-desplazamiento, B es el espesor de las muestras analizadas y η es un factor geométrico que para las probetas DDENT se expresa como.^[30]

$$\eta = -0.06 + 5.99\left(\frac{a}{W}\right) - 7.42\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 3.29\left(\frac{a}{W}\right)^3 \quad \text{[Ecuación 5.4]}$$

Las unidades para J_c son $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$. En este trabajo se ensayaron al menos cinco probetas con $a/W=0.5$ a una velocidad de $1 \text{ mm}/\text{min}$ para cada material que presentó comportamiento semi-frágil.

5.3.6.2. RÉGIMEN POST-FLUENCIA

Para las mezclas que exhibieron un comportamiento a la fractura de post-fluencia, la resistencia a la fractura se evaluó mediante el método del Trabajo Esencial de Fractura (*EFW*, *Essential Work of Fracture*) que pertenece a la PYFM.^[31]

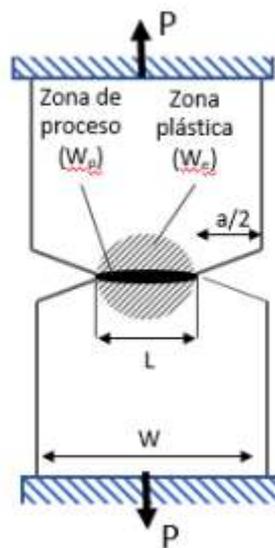


Figura 5-4. Esquema de las diferentes zonas relacionadas con el proceso de fractura.

De acuerdo con la teoría del trabajo esencial de fractura, el trabajo total (W_t) requerido para fracturar una probeta con entalla aguda puede ser dividido en dos componentes.^[32] En la **Figura 5-4** se presenta un esquema de ambas zonas. El primer término es el trabajo esencial de fractura (W_p) y está relacionado con la energía necesaria para crear nuevas superficies, es decir, es la energía disipada para fracturar el polímero en su zona de proceso y es proporcional a la sección del ligamento LB . La segunda parte es el trabajo no-esencial de fractura (W_e) y es la energía disipada por diversos mecanismos de deformación en la zona donde ocurre la deformación plástica, está relacionada con una zona que rodea la zona de proceso y la energía involucrada allí es proporcional al volumen de la región deformada.

Durante la propagación de la fisura gran parte del trabajo de fractura disipado en la zona plástica no se asocia directamente con el proceso de fractura, es decir, con la creación de

nuevas superficies. Sólo aquel trabajo que se emplea en el proceso de fractura es una constante del material. ^[33] Se puede escribir, por lo tanto:

$$W_f = W_e + W_p = w_e \cdot LB + \beta w_p \cdot LB \text{ [Ecuación 5.6]}$$

Dividiendo la **Ecuación 5.6** por el área del ligamento LB, se obtiene el trabajo específico de fractura (designado con la letra w en minúscula), w_f :

$$W_f = W_f / (LB) = w_e + \beta w_p \text{ [Ecuación 5.7]}$$

Donde w_e es el trabajo esencial específico de fractura (por unidad de área del ligamento), w_p es el trabajo específico no-esencial de fractura (por unidad de volumen), B es el espesor de la muestra y β es el factor de forma de la zona plástica. A partir de una serie de ensayos realizados sobre probetas con distintas longitudes de entalla (diferentes ligamentos) se puede graficar el trabajo específico w_f vs L y a partir de la regresión lineal de los datos, se pueden determinar los valores de w_e y βw_p como la ordenada al origen y la pendiente, respectivamente. ^[31]

El número de probetas a ensayar no está estipulado y su número óptimo varía según el material. Se recomienda rechazar, de la regresión lineal, los puntos que se desvíen de la recta más de dos veces la desviación estándar de la regresión ^[34] Por otro lado, la calidad de la entalla también afecta considerablemente a los resultados de w_e siendo recomendable garantizar un radio de entalla inferior a 40 μm .

5.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.5.1. ANÁLISIS MORFOLÓGICO

5.5.1.1. ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER

El análisis por FTIR se realizó sobre los 4 tipos de muestra, el vPET y el rPET por ambos métodos de secado analizados. Los espectros IR obtenidos se muestran en la **Figura 5-5**.

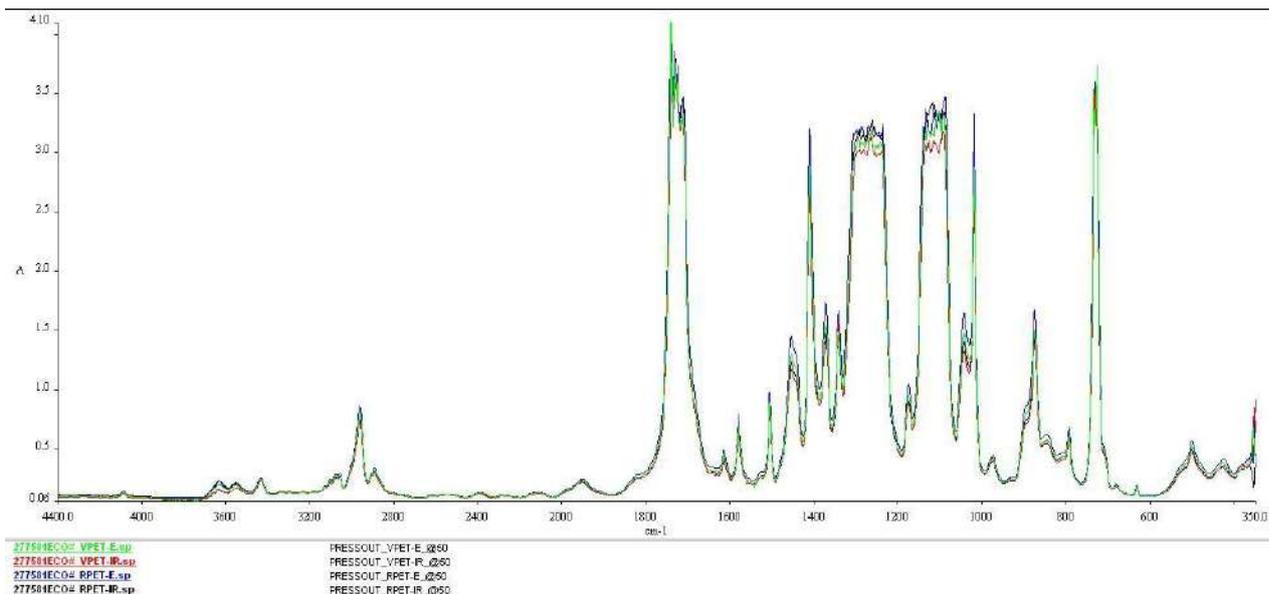


Figura 5-5. FTIR para las cuatro muestras

Como se puede observar en la **Figura 5-5**, en los cuatro espectros se observa una superposición de picos. Esto indica que los mismos grupos funcionales están presentes y no se inducen cambios en la estructura química como consecuencia del tipo de secado ni del reciclado del material.

5.5.1.2. FTIR-ATR

El análisis por FTIR se realizó sobre las mismas 4 tipos de muestras a comparar. Los espectros FTIR obtenidos se muestran en la **Figura 5-6**. Como se puede observar, nuevamente se obtuvieron curvas con superposición de picos para todas las muestras. Estos resultados dan un indicio de que no aparecen otros tipos de enlaces como por ejemplo entrecruzamientos, reforzando la idea de que el reciclado y el IR no modifican el material químicamente.

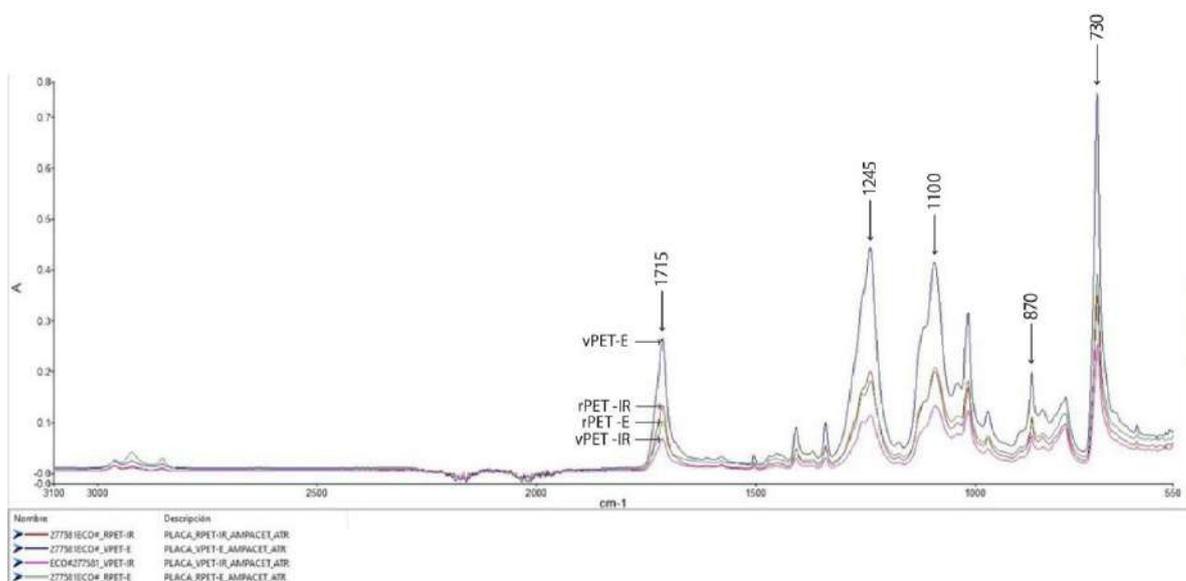


Figura 5-6. IR para todas las muestras.

Todas las bandas de absorción contempladas en la **Figura 5-6** corresponden a las bandas características del material PET reportadas en la literatura [35]. Dichos picos corresponden a distintos grupos detallados en la **Tabla 5-3**, según datos bibliográficos [36].

Tabla 5-3. Picos característicos del PET.

Longitud de onda (cm-1)	Grupo asignado
1715	C=O
1245	Eter aromático (C-O)
1100	Eter alifático (C-O)
870	Aromático (C-H)
730	Alifático (C-H)

Si bien las curvas exhiben superposición de picos, se observó que la intensidad de los mismos difiere según la muestra. Las muestras de material virgen exhiben una gran diferencia entre sus intensidades (siendo la del vPET-E y la del rPET-IR la de mayor y menor intensidad respectivamente), mientras que no ocurre lo mismo con las muestras recicladas. Las diferencias en las intensidades en FTIR se observan cuando hay un cambio en la densidad de enlaces: una mayor intensidad implica una mayor cantidad de enlaces, es decir cadenas más largas. Entonces, el vPET-IR al presentar la menor intensidad posee cadenas más cortas, lo cual indica que puede haber procesos degradativos que implican cortes de cadena en el material.

5.5.1.3. CARACTERIZACIÓN TÉRMICA

Las curvas obtenidas en la primera corrida de los ensayos de DSC se observan en la **Figura 5-7** para el PET virgen y en la **Figura 5-8** para el PET reciclado.

Los ensayos preliminares, mostraron que el material obtenido del reciclado de las botellas era efectivamente PET ya que los picos característicos de dicho material coinciden con los obtenidos de los termogramas, **Figura 5-8**.

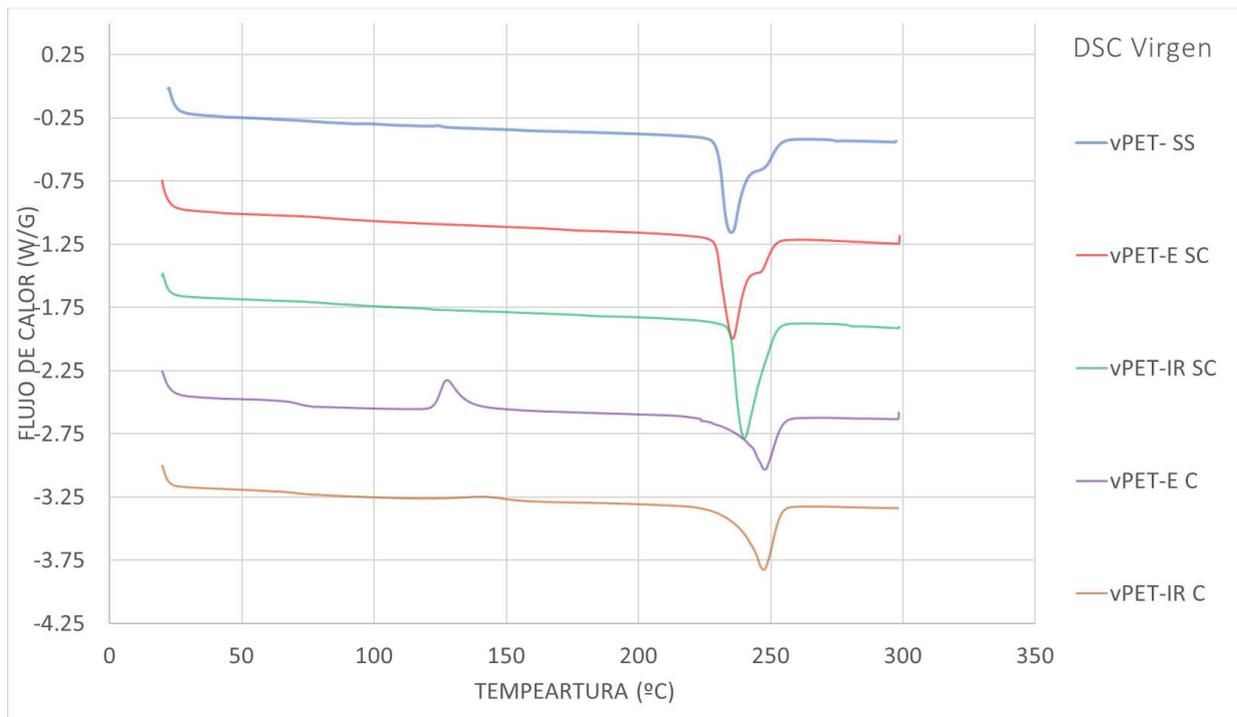


Figura 5-7. Endotermas para el material virgen.

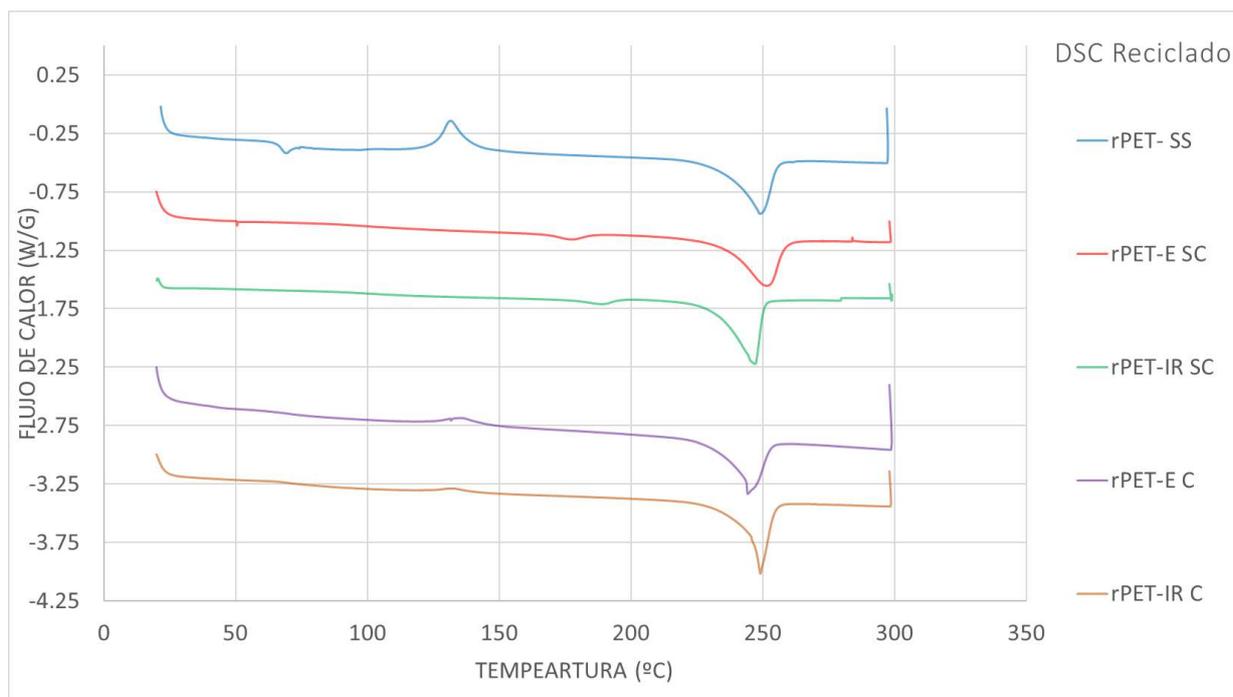


Figura 5-8. Endotermas para el material reciclado.

En la Tabla 5-3 podemos ver las propiedades extraídas de los gráficos para los 10 tipos de muestras.

Tabla 5-3. Propiedades obtenidas del DSC en el primer ciclo de calentamiento.

Nombre de la muestra	T _c (°C)	T _f (°C)	Porcentaje de cristalinidad primer ciclo	Porcentaje de cristalinidad segundo ciclo
<i>vPET</i> _{SS}	-	234.95	40.79%	23.94%
<i>vPET</i> – <i>E</i> _{SC}	-	235.53	42.81%	20.27%
<i>vPET</i> – <i>IR</i> _{SC}	127.57	247.82	43.61%	22.92%
<i>vPET</i> – <i>E</i> _C	-	240.03	25.72%	22.92%
<i>vPET</i> – <i>IR</i> _C	143.54	247.29	31.88%	30.95%
<i>rPET</i> _{SS}	131.68	248.96	30.95%	29.04%
<i>rPET</i> – <i>E</i> _{SC}	176.7	251.24	32.71%	25.62%
<i>rPET</i> – <i>IR</i> _{SC}	136.61	244.29	30.76%	23.87%
<i>rPET</i> – <i>E</i> _C	188.84	247.15	30.54%	30.12%
<i>rPET</i> – <i>IR</i> _C	133.16	248.07	31.21%	29.91%

Se observó que los materiales de partida vPET SS y el rPET SS poseen porcentajes de cristalinidad diferentes, 40.79% y 30.95% respectivamente. El vPET antes de conformar presenta el mayor porcentaje de cristalización de todas las muestras analizadas, es decir que probablemente dicho valor sea el máximo porcentaje de cristalinidad al que este grado de PET puede llegar, es por eso que no se ve un pico de cristalización para dicha muestra. Cuando se lo procesa se inhibe en parte la cristalización, por eso se ve que el pico y los porcentajes disminuyen. Esto puede deberse a que durante el enfriamiento las velocidades de enfriamiento involucradas son tan altas como para inhibir parcialmente que el PET cristalice. Además, la cristalinidad del vPET-IR es un 23% mayor que para el vPET-E C. La literatura muestra reportes en los que debido a un incremento de la degradación aparece un aumento en la cristalinidad.^[37]

Estas observaciones están íntimamente ligadas con lo observado en las gráficas de pérdida de humedad del **Capítulo 3**. Dichas gráficas muestran que el material reciclado exhibe una velocidad de pérdida de humedad mayor que el material virgen. La permeabilidad de un polímero semicristalino depende, entre otras cosas, de su porcentaje de cristalinidad: un menor porcentaje de cristalinidad induce un mayor porcentaje de permeabilidad. Es decir que el material reciclado al presentar un menor porcentaje de cristalinidad, absorbe más agua y también la elimina más rápido.

Con respecto al material reciclado, se observó que el porcentaje de cristalinidad post conformado dio valores similares para muestras secadas por los dos métodos usados en el presente trabajo final.

En el segundo ciclo, en todos los casos se observa una disminución en la cristalinidad. Esto se debe a que la velocidad de enfriamiento involucrada fue superior a la utilizada en el procesamiento. De todas las observaciones y análisis previos se puede concluir que el PET es un material muy sensible a la velocidad de enfriamiento durante el procesamiento.

5.5.2. ANÁLISIS REOLÓGICO

Los resultados que se obtuvieron al hacer el ensayo de MFI se muestran en la **Tabla 5-4**.

Tabla 5-4. Resultados de *Melt Index*

Nombre de la muestra	Masa en 10 minutos [g]
vPET-E C	46.49
vPET-IR C	66.46
rPET-E C	56.7
rPET-IR C	56.34

Se observó que el rPET presenta valores similares de MI, independientemente del tipo de secado utilizado, al contrario de lo que sucede con el vPET. Esto indica que el secado por IR no indujo cambios en las propiedades reológicas del material reciclado.

Con respecto al material virgen, en el caso del vPET-IR se obtuvo un mayor índice de fluidez que para el caso del vPET-E. Un mayor índice de fluidez indica un material menos viscoso, es decir que posee cadenas poliméricas más cortas, por ende, un menor peso molecular. El vPET-IR presenta un menor peso molecular que el vPET-E, debido a una posible degradación inducida por el secado IR.

5.5.3. ANÁLISIS MECÁNICO

5.5.3.1. FLEXIÓN EN 3 PUNTOS

Las gráficas obtenidas a partir del ensayo de flexión se muestran en la **Figura 5-9**. Se muestra una curva para cada tipo de muestra, con excepción del rPET-IR en el que se observaron dos comportamientos mecánicos distintos y se graficaron dos curvas representativas. La totalidad de curvas se encuentran en **ANEXO 1**.

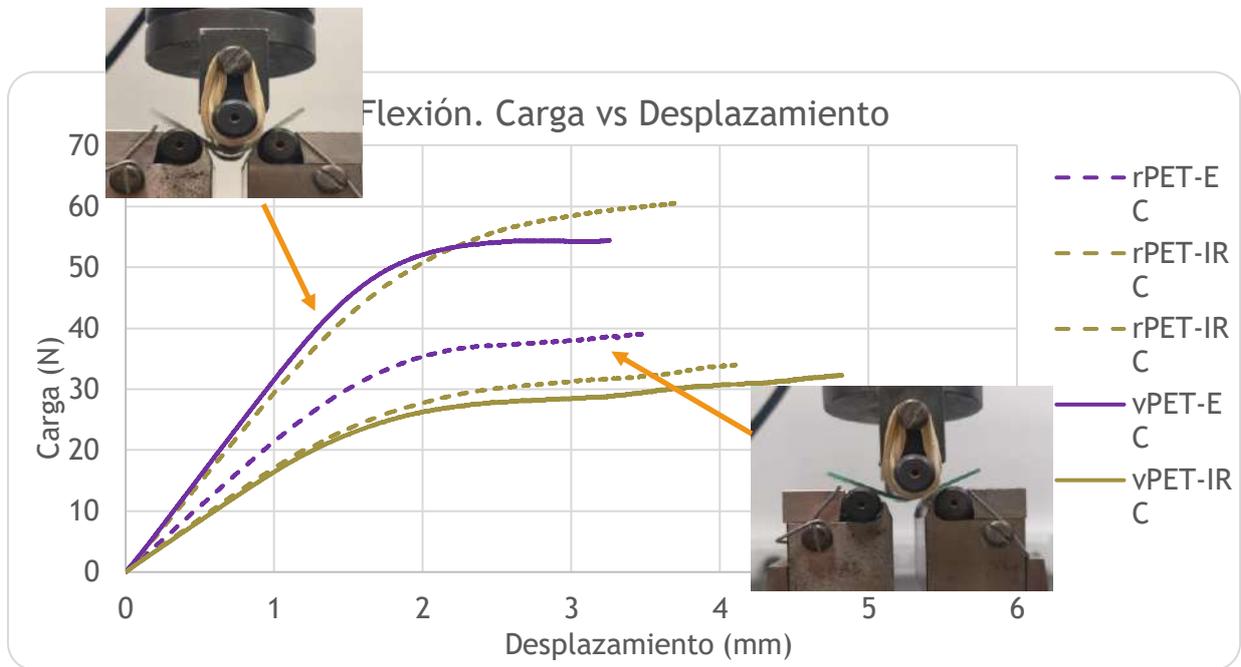


Figura 5-9. Comportamiento a la flexión

Con los módulos de elasticidad en flexión de cada tipo de muestra se realizó un gráfico de barras junto con sus barras de error para poder hacer una comparativa, se muestra en la Figura 5-10.

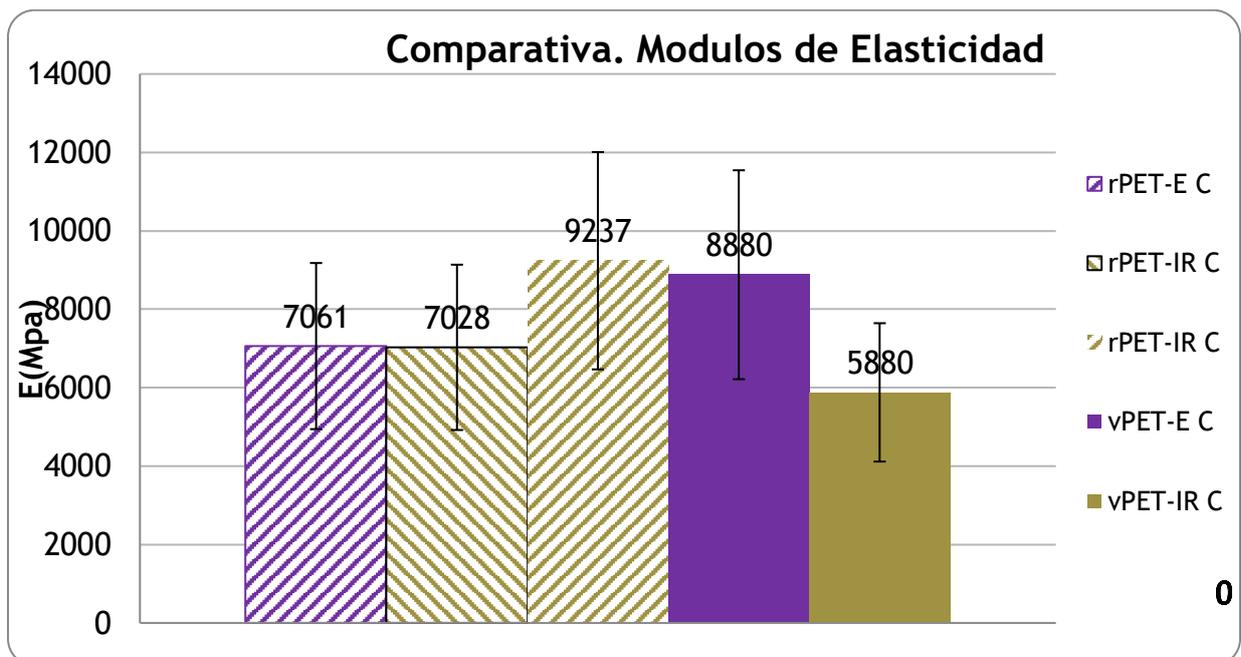


Figura 5-10. Módulos de elasticidad en flexión

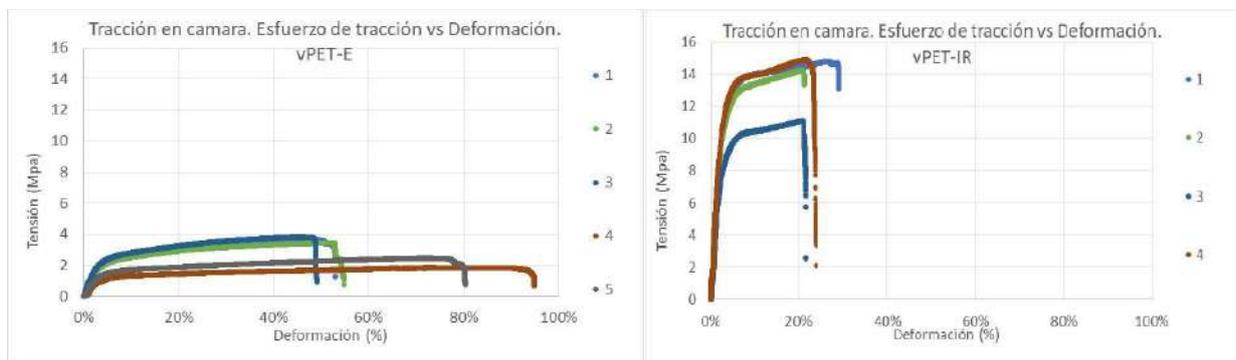
Se observó que el valor del módulo en flexión del rPET no presenta diferencias significativas en comparación con el del vPET, lo que indicaría que el material al ser reciclado no pierde rigidez en flexión.

El rPET-IR muestra dos comportamientos diferentes, esto puede deberse a que el material reciclado presenta cierta inhomogeneidad debido a una distribución de pesos moleculares en la mezcla. El motivo puede deberse a que el material reciclado fue triturado y no pelletizado, proceso que asegura una mayor homogeneidad del material.

Para el caso del vPET se observaron diferencias en los valores del módulo según del tipo de secado, obteniéndose valores más bajos para las muestras secadas por IR.

5.5.3.2. TRACCIÓN EN CÁMARA

Las curvas tensión-deformación obtenidas para los distintos materiales sometidos a los dos métodos de secado se muestran en la **Figura 5-11**. Durante la tracción inicial de la probeta se produce una deformación homogénea y la curva tensión-deformación muestra un aumento constante de la carga al aumentar la deformación. Luego, la curva alcanza un máximo, correspondiente al inicio de la formación de cuello en la probeta. Finalmente, una mayor extensión del cuello provoca una caída de la carga seguida de la rotura.



a) vPET-E C

b) vPET-IR C

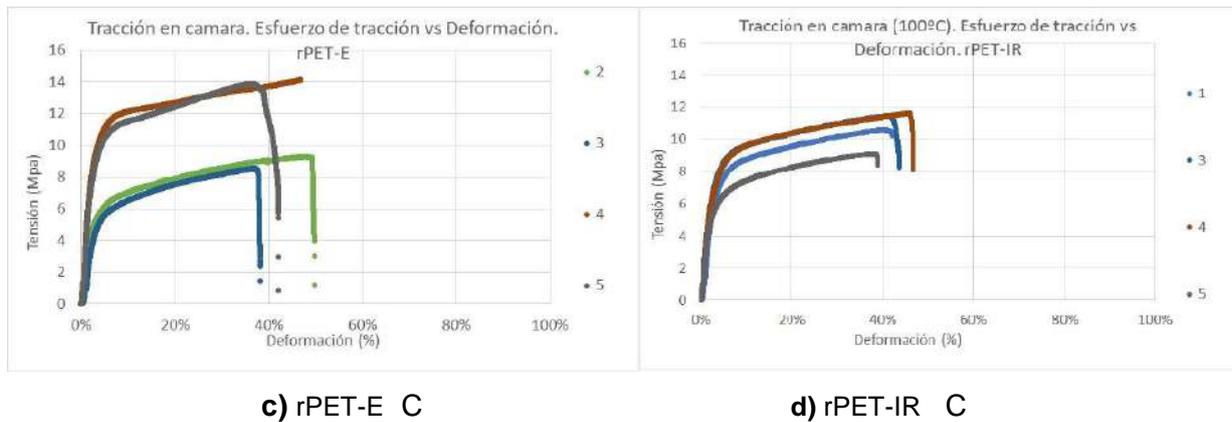


Figura 5-11. Ensayos de tracción en cámara a 100°C

Con respecto al material virgen, se puede observar una clara diferencia en cuanto al porcentaje de deformación a la rotura según el método de secado empleado, exhibiendo el vPET-IR y el vPET-E un porcentaje de deformación a la rotura de entre un 20-30% y 50-90% respectivamente. Caso inverso sucede con los valores de carga máxima, obteniendo valores cercanos a 12-14 Mpa para el vPET-IR y 2-4 Mpa para el vPET-E. Se puede concluir entonces que el secado en horno IR rigidiza al material virgen.

El material reciclado muestra similar porcentaje de deformación y carga máxima para ambas técnicas de secado. La deformación alcanza un valor de 40-50% y la carga ronda cercana a 8-12 Mpa, siendo esta deformación óptima para el método de conformado a utilizar, termoformado. Para el caso del rPET-E se observaron dos comportamientos distintos, nuevamente esto puede ser debido a la inhomogeneidad del material. Además, los valores de deformación a la rotura y carga están comprendidos dentro los valores hallados para el material virgen, por lo cual en principio se podría afirmar que el material reciclado es apto para ser termoformado.

4.5.3.3. COMPORTAMIENTO A LA FRACTURA

Se llevaron a cabo pruebas preliminares para cada tipo de material secado por ambos métodos, para reconocer el tipo de comportamiento que presentan cada uno a la fractura. Mientras que el rPET exhibió un comportamiento semi-dúctil el vPET experimentó un régimen post-fluencia. Por lo tanto, se evaluó cada uno de manera distinta siguiendo los criterios de la mecánica de fractura descriptos anteriormente.

Las curvas típicas de fractura carga-desplazamiento obtenidas para el vPET se presentan en la **Figura 5-12** y el trabajo de fractura en la **Figura 5-13**.

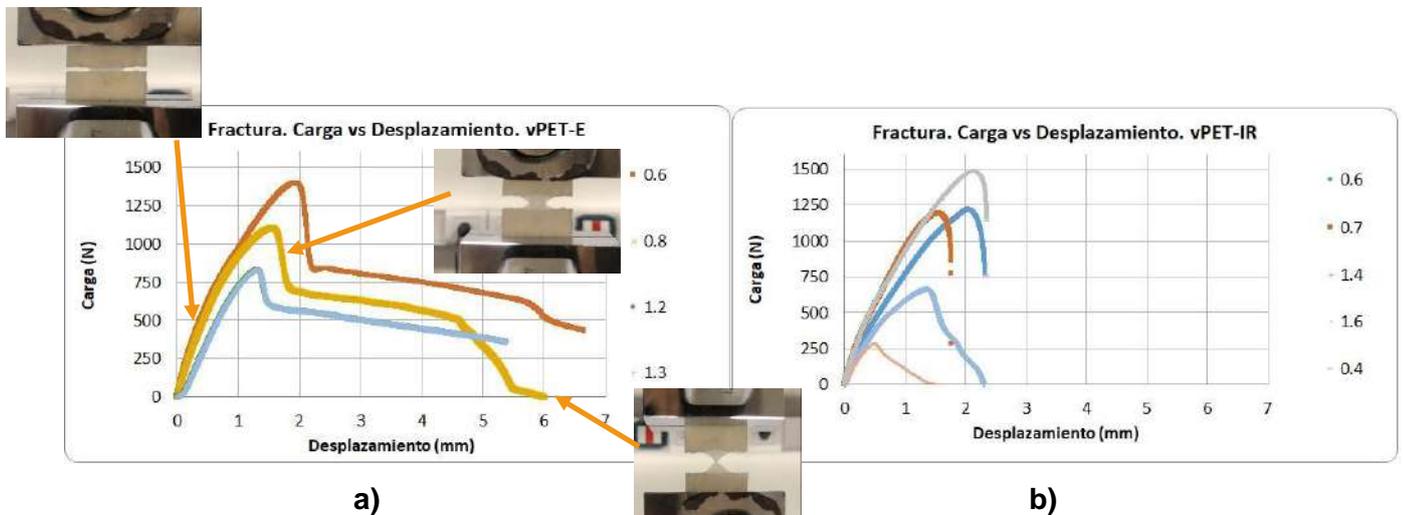


Figura 5-12. Ensayos de fractura. EWF e imágenes de daño macroscópico

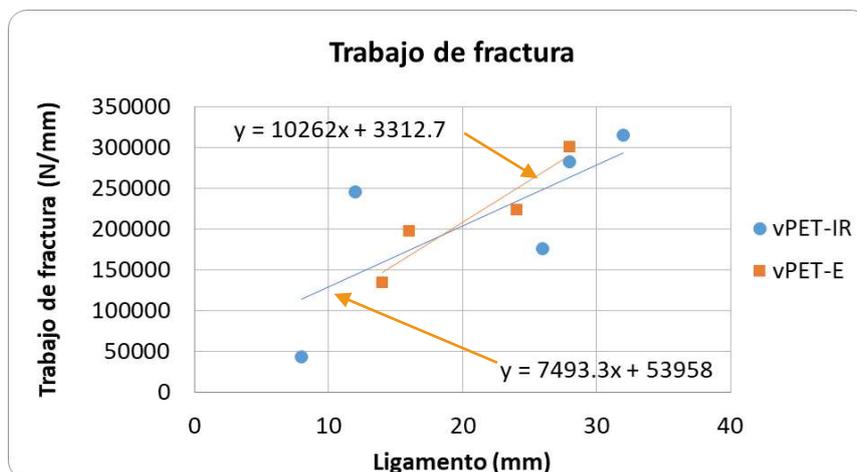
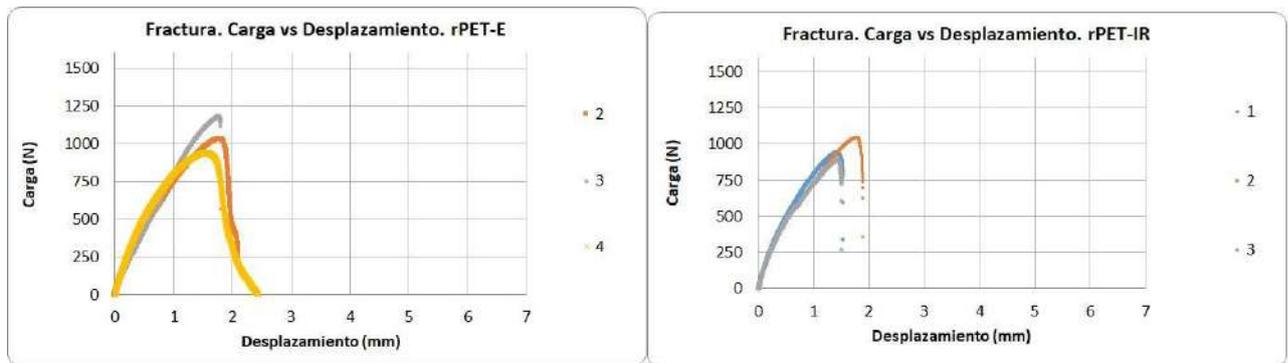


Figura 5-13. Trabajo de fractura del vPET.

Estos resultados no son concluyentes debido a la poca cantidad de puntos que cumplían con los criterios aplicados en EWF, para dicho análisis es necesario contar con más puntos.

Las curvas típicas de fractura carga-desplazamiento obtenidas para el rPET se presentan en la **Figura 5-14** y el trabajo a la fractura (J_c) en la **Figura 5-15**.



a) b)
Figura 5-14. Ensayos de fractura. Régimen Semi Frágil

Se observó que para el caso del material reciclado ambos tipos de secados presentan curvas similares con respecto a los niveles máximos de carga y desplazamientos, obteniendo valores de 900-1100 N y 1,5-2,5 mm, respectivamente.

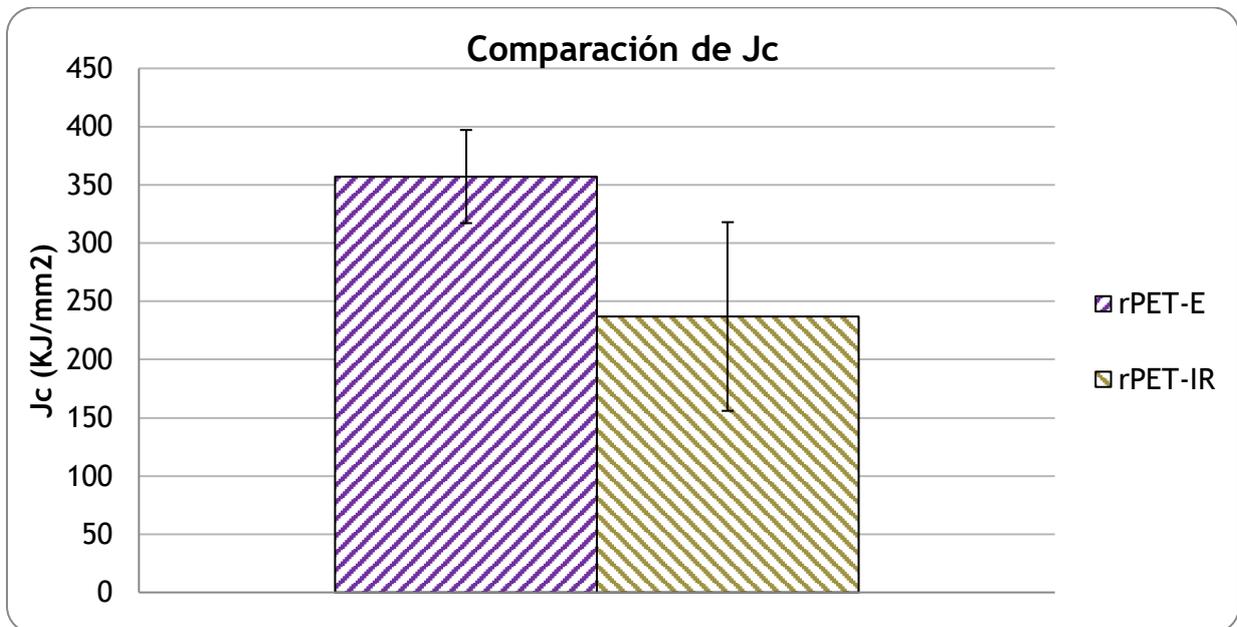


Figura 5-15. Comparación de J_c para rPET-E y rPET-IR

Con respecto al valor de la tenacidad a la fractura J_c, vemos que para el rPET-E este valor es levemente mayor que para el rPET-IR. Sin embargo, el material secado por IR presenta una mayor dispersión de los datos.

El secado por IR del material reciclado no modifica notablemente ni el tipo de comportamiento ni los valores de tenacidad.

5.6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para poder correlacionar los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados se construyó la **Tabla 5-5.**, en la que se incluyen los resultados de las determinaciones experimentales de caracterización antes explicadas.

Tabla 5-5. Resultados experimentales obtenidos.

Muestra	Cristalinidad (%)	MI (g/10min)	Modulo de Elasticidad (Gpa)	Deformación en tracción a 100°C (%)	Carga máxima en tracción. 100°C (Mpa)	EWf	Tenacidad a la fractura (Jc) (KJ/mm2)
vPET-E	25,7	46,7	8,9 ± 2,7	69,3 ± 18,8	3,1 ± 0,9	-	-
vPET-IR	31,9	66,5	5,9 ± 1,8	24,8 ± 3,1	13,8 ± 1,8	-	-
rPET-E	30,5	56,7	7,1 ± 2,2	46,4 ± 7,1	11,5 ± 3,0	-	357,1 ± 29,2
rPET-IR	31,2	56,3	7,0 ± 2,1/9,2 ± 2,8	42,9 ± 3,3	10,7 ± 1,6	-	237,0 ± 81,5

Con respecto al material virgen se puede concluir de acuerdo con los resultados encontrados que el secado en horno IR al tiempo utilizado afecta la longitud de las cadenas poliméricas (reflejado en la disminución de intensidad de los picos de FTIR, y consecuente disminución de viscosidad) y la estructura morfológica del material (aumento del porcentaje de cristalinidad). Esto resulta en cambios en el desempeño mecánico del material, volviéndolo más rígido y menos dúctil, como se ve reflejado en los ensayos de flexión y tracción.

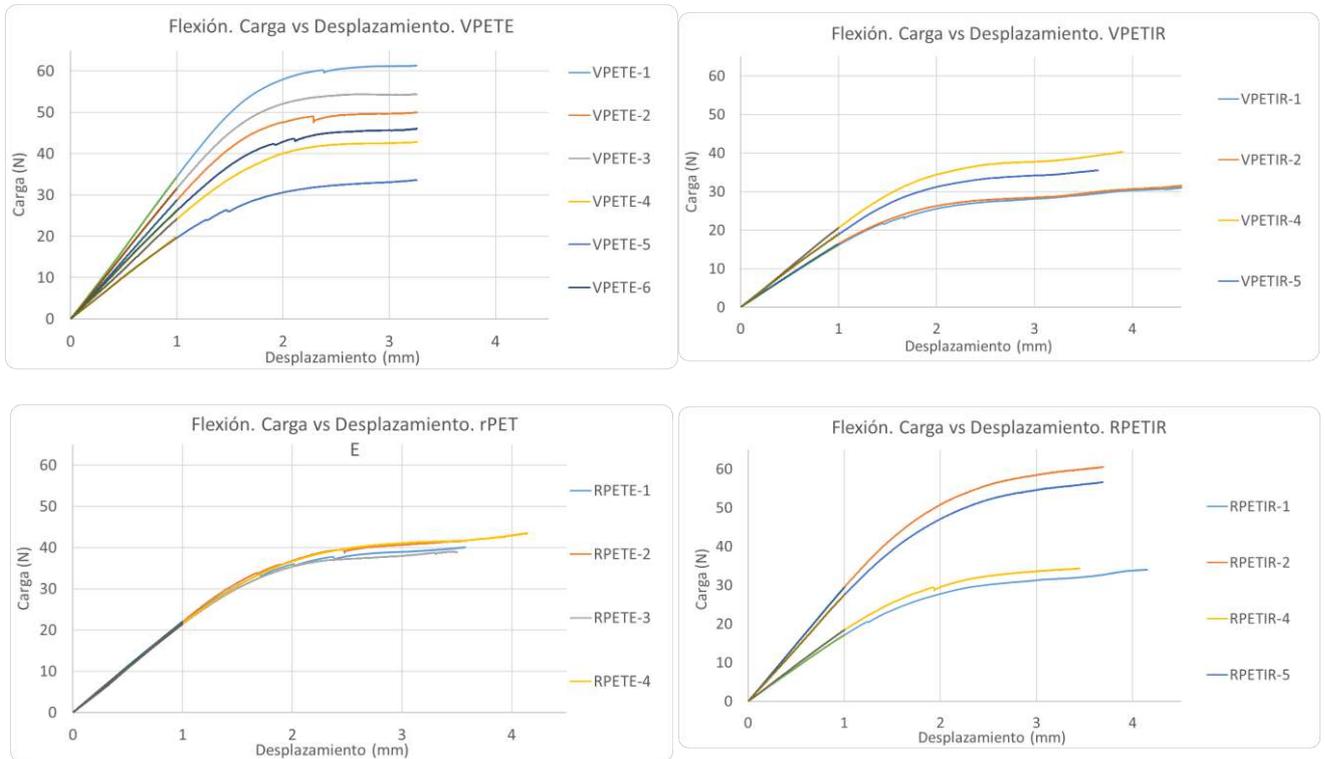
Por otro lado, se observó similitud en las características y valores de propiedades del material reciclado secado por los dos métodos distintos. Es decir, se obtuvieron valores similares de fluidez y cristalinidad, módulo en flexión, resistencia a la tracción a alta temperatura, y tenacidad a la fractura. Por lo tanto, se puede concluir que el secado en horno IR no produce cambios en la estructura ni en el comportamiento. De acuerdo con la bibliografía, la mayor pérdida de propiedades por degradación heterolítica del PET se produce durante los primeros ciclos de reciclado (o reprocesamiento).^[38] Se puede concluir entonces que la mayor disminución en las propiedades sucede durante el primer ciclo de reprocesamiento, y que el secado por horno IR no adiciona una degradación posterior, logrando una estabilización de las propiedades a partir del segundo ciclo de procesamiento.

En consecuencia, para el material reciclado se lograron obtener propiedades similares con el secado por horno IR a las del material secado en estufa, con una reducción del tiempo de

secado del 80% (de 210 a 40 minutos). Este es un resultado altamente prometedor ya que la implementación de esta técnica de secado permitiría disminuir los costos de energía asociados del proceso de reciclado, convirtiéndolo en un proceso más competitivo

5.8. ANEXO

5.8.1 ANEXO 1



5.8.2. ANEXO 2

ENSAYOS		m	prom m	delta m	Error relativo	Eb Mpa	Delta Eb Mpa
		N/mm	N/mm	N/mm			
vPET-E	1	34.222	27.5277	5.12245	18.61%	8880	2664.35
	2	28.679					
	3	31.567					
	4	24.176					
	5	20.013					
	6	26.509					
vPET-IR	1	16.368	18.2283	2.08003	11.41%	5880	1764.33
	2	16.636					
	3						
	4	20.67					
	5	19.239					
rPET-E	1	22.138	21.8883	0.33348	1.52%	7061	2118.43
	2	22.211					
	3	21.562					
	4	21.642					
	5						
rPET-IR 1	1	17.187	21.787	6.81306	0.31271	7028	2108.92
	2	18.56					
rPET-IR 2	4	29.614	28.635	1.38452	0.04835	9237	2771.37
	5	27.656					

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJO A FUTURO

6.1 CONCLUSIONES GENERALES

Como primera conclusión general se puede afirmar que se lograron cumplir satisfactoriamente todos los objetivos planteados, desde el aprendizaje de cada una de las distintas etapas de reciclado del PET, pasando por la construcción de un horno IR para el estudio de la etapa de secado, hasta finalmente la obtención y evaluación del desempeño de placas de termoformado de PET reciclado.

A lo largo del desarrollo del trabajo se arribó a varias conclusiones particulares, que se detallan a continuación:

- Se adquirió conocimiento teórico y práctico acerca del reciclado del PET, siendo éste un proceso no trivial de alta complejidad. Se comprendió que cada etapa dentro del ciclo de reciclado tiene una gran influencia en el desempeño final del material obtenido como así también en los costos finales.
- Se logró construir satisfactoriamente un horno de radiación infrarroja para evaluar una alternativa de secado de PET no convencional. El mismo se construyó de una forma económica y práctica para su uso en laboratorio, con control de la potencia, RPM y temperatura.
- El secado en horno IR disminuyó los tiempos de proceso significativamente, lo cual se traduce en menores costos de producción, logrando así un aumento en los márgenes de beneficio.
- Se lograron obtener placas para termoformado de PET a partir de material virgen y reciclado. Se estudió su microestructura y reología, junto con una caracterización mecánica, evaluando el desempeño de ambos materiales sometidos a distintos tipos de secado.
- El secado en horno IR no afectó la microestructura ni las propiedades finales del PET reciclado, en comparación con PET reciclado secado en horno convencional, exhibiendo propiedades competentes para ser utilizado en un posterior proceso de conformado. Por lo tanto, el uso del secado IR brindó resultados óptimos a la hora de trabajar con material reciclado, logrando ventajas energéticas, ambientales y económicas. Sin embargo, al aplicar este tipo de secado por 40 minutos a material virgen, este sufre una leve degradación que se vio reflejado en las propiedades evaluadas, por lo que es necesario optimizar este tipo de secado en PET virgen

6.2 TRABAJO FUTURO

A partir de las conclusiones obtenidas en el presente trabajo y considerando el potencial beneficio de utilizar material reciclado como reemplazo de materia prima virgen (con los beneficios de ahorro de tiempo que ofrece el nuevo método de secado), se plantean nuevos retos que será necesario abordar en un futuro próximo. De esta forma, la continuación del presente trabajo deberá plantearse los siguientes objetivos:

- Completar el estudio del desempeño mecánico (flexión, y comportamiento a la fractura) de las muestras analizadas en el presente trabajo.
- Analizar el efecto de las distintas condiciones de secado que permite el horno IR (intensidad, tiempo, velocidad de rotación), para optimizar la utilización de este método de secado no convencional.

BIBLIOGRAFIA

- 1- Francis, R. (Ed.). (2016). Recycling of polymers: methods, characterization and applications. John Wiley & Sons.
- 2- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci Adv* 3: e1700782.
- 3- ONU Environment. 2018. SINGLE-USE PLASTICS: A Roadmap for Sustainability
- 4- <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html>
- 5- <https://www.cronista.com/informacion-gral/Basural-PET-en-la-Argentina-se-tiran-12-millones-de-botellas-de-plastico-por-dia-20170201-0026.html>
- 6- <https://www.aristegui.info/identificacion-de-los-plasticos-por-sus-codigos/>
- 7- <https://www.pt-mexico.com/articulos/reciclado-quimico-una-alternativa-de-valor-dentro-de-la-economia-circular-de-los-plasticos>
- 8- http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/1638/3614

- 9- Raúl Rivera Távara Piura, 23 de diciembre de 2004. Tesis para optar el Título de Ingeniero Industrial y de Sistemas. Propuesta de reciclaje mecánico de plásticos en la ciudad de Piura.
- 10- <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/coloracion-de-plasticos.html>
- 11- <https://www.tridimage.com/como-son-o-deberian-ser-las-botellas-que-hacen-mas-eficiente-el-reciclaje/>
- 12- http://stserviciotecnico.com.ar/wordpress/wpcontent/uploads/2016/07/Informacion_de_PET.pdf
- 13- <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/deshimidificacion-de-plasticos.html>
- 14- <https://www.moscorner.com/es/que-importancia-tiene-el-punto-de-rocio-en-el-secado-de-los-plasticos/#:~:text=A%20medida%20que%20el%20aire,de%204%2C8g%2Fm%2%B3>
- 15- <https://alianzaautomotriz.com/tips-para-secado-por-infrarrojos/>
- 16- <https://www.pt-mexico.com/articulos/la-cristalinidad-amigo-o-enemigo-durante-el-procesamiento-del-pet>
- 17- <https://plataformazeo.com/es/cuanto-co2-emite-el-plastico/>
- 18- <https://novapet.com/noticias/examen-de-la-huella-de-carbono-basado-en-el-analisis-del-ciclo-de-vida-de-un-material/>

- 19- <http://www.container-recycling.org/assets/pdfs/plastic/>
- 20- <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/364/1526/2115.full#ref-58>
- 21- <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>
- 22- <https://www.pt-mexico.com/banco-de-conocimiento/secado-de-plasticos/tipos-de-secadores/cristalizador-secador-infrarrojo>
- 23- <https://www.plastico.com/temas/Que-opciones-hay-para-secar-plasticos+3041537?pagina=2>
- 24- <https://www.fundacionendesa.org/es/recursos/a201908-elementos-circuito-electrico>
- 25- <https://www.bejob.com/que-es-la-programacion-con-arduino-y-para-que-sirve/>
- 26- <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/17048-Factores-de-influencia-importantes-durante-el-proceso-de-reciclado-de-plasticos.html>
- 27- Karger-Kocsis, J., and D. E. Mouzakis. 1999. "Effects of Injection Molding-Induced Morphology on the Work of Fracture Parameters in Rubber-Toughened Polypropylenes." *Polymer Engineering and Science* 39(8):1365–74.
- 28- Anderson. 2017. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. Fourth Edi. Arnal, M. L., M. E. Matos, R. A. Morales, O. O. Santana, and A. J. Müller. 1998. "Evaluation of the Fractionated Crystallization of Dispersed Polyolefins in a Polystyrene Matrix." *Macromolecular Chemistry and Physics* 199(10):2275–88.
- 29- ASTM E1820. 1996. *Standard Test Method for Measurement of Fracture*.
- 30- Grellmann, W., and K. Reincke. 2004. "Quality Improvement of Elastomers – Application of Instrumented Notched Tensile-Impact Testing for Assessment of Toughness." *Material Prufung* 46:168–175.
- 31- Clutton, E. Q. 2000. "ESIS TC4 Experience with the Essential Work of Fracture Method." *European Structural Integrity Society* 27:187–199.
- 32- Cotterell, B., and JK Reddel. 1977. "The Essential Work of Plane Stress Ductile Fracture." *International Journal of Fracture* 13:267–77.
- 33- Karger-Kocsis, J. 2000a. "Microstructural and Molecular Dependence of the Work of Fracture Parameters in Semicrystalline and Amorphous Polymer Systems." *European Structural Integrity Society* 213–30.
- 34- Moore, D.R, Pavan A., and Williams J.G., Editors., ed. 2001. *Essential Work of Fracture, in Fracture Mechanics Testing Methods for Polymers, Adhesives and Composites*. Vol.5. Elsevier Science, Ltd.: Oxford.
- 35- Chikaoui, K., Izerrouken, M., Djebara, M., & Abdesselam, M. (2017). Polyethylene terephthalate degradation under reactor neutron irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*, 130, 431-435.

- 36- Sang, T., Wallis, C. J., Hill, G., & Britovsek, G. J. (2020). Polyethylene terephthalate degradation under natural and accelerated weathering conditions. *European polymer journal*, 136, 109873.
- 37- <https://www.pt-mexico.com/articulos/problemas-decisivos-en-reciclado-de-pet-degradacion>
- 38- J.D. Badr´a a , Francisco Vilaplana a,b , Sigbritt Karlsson b , A. Ribes-Greus. (2008). Thermal analysis as a quality tool for assessing the influence of thermo-mechanical degradation on recycled poly(ethylene terephthalate). *Polymer Testing* 28 (2009) 169-175.