



PROMPT

"Foto de un hombre caminando sobre un depósito de desechos de ropa, alta resolución, fotograma completo, 4k HD"

"Photo of a man walking on a clothing junkyard, hi resolution, full frame, 4k HD"

AVANCES DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN EL SISTEMA MODA

Advances in Circular Economy in the Fashion System

Sergio Iván Puerto Rico

Centro de Diseño Tecnológico Industrial -
SENA Regional Valle del Cauca

Mayra Eliana Valencia Zapata

Universidad del Valle

Astrid Lili Puerta Monsalve

Centro Agropecuario de Buga SENA -
SENA Regional Valle del Cauca

RESUMEN

LOS RESIDUOS GENERADOS DURANTE LA PRODUCCIÓN de materiales textiles pueden clasificarse como residuos pre-consumo y post consumo. En la mayoría de los casos, estos residuos se incineran o se arrojan en vertederos, lo que a su vez tiene un factor en el medio ambiente y en el crecimiento económico. Para reducir dichos efectos, hay que tomar medidas de mitigación para adoptar una gestión sostenible de los residuos textiles y frenar el impacto ambiental negativo. En este artículo se presentan los avances que se han producido a nivel mundial en el campo de la economía circular en la moda, y algunas estrategias de valor añadido y aprovechamiento de los residuos. Los avances no solo impactan positivamente el medio ambiente sino que también generan oportunidades económicas y de innovación en la industria textil y de la moda, contribuyendo a un desarrollo sostenible y alineado con los principios de la economía circular.

Palabras clave: Economía circular, Sistema moda, residuos textiles, reciclaje.

ABSTRACT

The waste generated during the production of textile materials can be classified as pre-consumer and post-consumer waste. In most cases, this waste is incinerated or dumped in landfills, which, in turn, has an impact on the environment and economic growth. To reduce these effects, mitigating measures need to be taken to adopt sustainable management of textile waste and curb negative environmental impacts. This article presents global advances in the field of circular economy in the fashion industry and various strategies for adding value and utilizing waste. These advances not only have a positive impact on the environment but also create economic and innovative opportunities in the textile and fashion industries, contributing to sustainable development in line with circular economy principles.

Keywords: Circular economy, fashion system, textile waste, recycling.

INTRODUCCIÓN

La generación de residuos es una consecuencia inevitable del aumento de la población, el crecimiento y el modelo económico de ‘tomar, hacer y desechar’. Para 2050, la humanidad generará 3.400 millones de toneladas métricas de residuos biodegradables y no biodegradables, y una parte significativa de la problemática se puede atribuir a los productos de consumo, incluidos los textiles y las prendas de vestir, que comprenden un flujo de residuos altamente complejo, diverso y heterogéneo que abarca muchos productos finales que van desde hilos sintéticos, tejidos de lana, ropa de cama de algodón, filtros industriales y pañales hasta ropa de alta costura (Chopra et al, 2022).

La industria textil es una de las industrias de bienes de consumo más esenciales (Chaka, 2021), que se encuentra en segundo lugar en el ranking de las más contaminantes debido al sobreconsumo, sumado a las condiciones en las que se fabrica la ropa. Solo por detrás del petróleo, la moda es el segundo mayor consumidor de agua a nivel mundial, generando alrededor del 20% de las aguas residuales. Además, requiere grandes cantidades de químicos en los procesos de obtención de materias primas, hilandería, tejeduría y tintorería. Por ejemplo, para fabricar unos jeans se utilizan 7500 litros de agua. El sector utiliza anualmente 93.000 millones de metros cúbicos y libera medio millón de microfibras sintéticas en el océano cada año (ONU, 2019). La moda también es responsable de la emisión del 9 – 10% del total de emisiones globales, principalmente gases de efecto invernadero (De Ponte, Liscio & Sospino, 2023) debido a que estas emisiones provienen del uso de pesticidas, el uso de aceites en el bombeo de agua para regar los cultivos de algodón y el uso de transporte marítimo y aéreo; produciendo más de 1600 toneladas de CO₂.

En síntesis, la huella ambiental de la industria de la moda es significativa debido a los sistemas de producción, consumo y los principales

materiales utilizados como algodón y poliéster. Por ejemplo, en el algodón se requieren grandes cantidades de agua, tierra, fertilizantes y pesticidas en el cultivo. Y en el caso del poliéster, a pesar de ser un material que proviene del tereftalato polietileno o conocido como PET reciclado, tiene una menor huella hídrica que el algodón, no es reciclable fibra a fibra una vez transformado en textiles, tampoco es biodegradable y genera contaminación de fuentes de agua en proporción de 700.000 partículas por cada carga de lavado. En este sentido, existen diferentes compromisos suscritos para la acción climática en el mundo, los cuales han sido motivados por la huella reciente de la actividad humana y su impacto negativo en la naturaleza. Por ejemplo, el Acuerdo de París representa un punto de inflexión y un consenso científico de que la actividad del ser humano es causante del aumento de la temperatura global a un ritmo que no tiene precedentes, en consecuencia, los modelos de negocio y dinámicas de producción y consumo actuales son insostenibles (ONU, 2015).

Es así como fabricantes, consumidores, instituciones y comunidades deben en principio conocer tales impactos y prepararse para asumir los objetivos para combatir el cambio climático. Cumplir con estas metas requiere de una mentalidad que genere nuevas formas de valor compartido, diferente a los modelos de producción empleados actualmente, donde la racionalidad económica no externalice la naturaleza de las cadenas productivas (Leff, 2022); en donde se consideran los recursos abundantes o infinitos, cómo si la eliminación de residuos fuese aislada o cómo si no se generarán emisiones a un ritmo peligroso; Por el contrario, todo cambio debe partir de la insustentabilidad ecológica de la economía actual y de los límites de la naturaleza como fuente principal de toda economía.

Hasta hace poco se consideraba que los residuos eran subproductos o sustancias indeseadas que ya no se podían usar. Sin embargo dicha concepción está cambiando actualmente

gracias al auge de la Economía Circular (EC), que considera los residuos como un recurso (Schmutz & Som, 2022). La idea detrás de la EC es reducir la presión ejercida sobre los recursos no renovables, reducir los residuos y minimizar los impactos ambientales en la producción y el consumo de productos. De acuerdo con Suhaimi, et al, (2022) y Todor, et al, (2022), existen tres opciones principales en la gestión de los residuos textiles: vertedero, reciclaje o incineración. Entre estas tres opciones, el reciclaje muestra el menor impacto de calentamiento global y uso de energía en comparación con las otras alternativas.

En este artículo se revisan las estrategias, tecnologías y normativas para el sector de la moda dentro del proceso de transición hacia un modelo de EC y su potencial de aplicación para el manejo de los residuos textiles generados en producción y la reducción de las emisiones, mediante estrategias de cierre de ciclo.

ESTRATEGIAS CIRCULARES EN LA INDUSTRIA DE LA MODA

En los últimos años, se han motivado iniciativas recientes como la Carta de la Industria de la Moda para la Acción Climática, firmada en 2018 y renovada en 2021 donde se proponen dos líneas de acción: la primera establecer objetivos de reducción de emisiones basados en la ciencia para lograr cero emisiones netas para el año 2050 y la segunda reducir al 50% las emisiones agregadas absolutas de Gases Efecto Invernadero (GEI) al AÑO 2030. Para lograrlo, las compañías suscritas se proponen para el año 2030, proveer el 100% de materiales respetuosos con el ambiente, lo cual incluye materiales que sean reciclados de ciclo cerrado, libres de deforestación y libres de transformación en sus orígenes aplicando prácticas regenerativas y mecanismos de medición de impacto ambiental relevantes (UNFCCC,2022).

En la industria hoy se entiende que se requiere un cambio urgente, pero no se tiene aún muy claro cómo hacerlo, es así como aparecen enfoques como la circularidad, que direcciona la investigación e innovación hacia sistemas económicos, sociales y tecnológicos sustentables. En este sentido se estima que la producción de residuos sólidos puede reducirse en 654 millones de toneladas métricas para el 2030 por medio de estrategias como: prolongar el ciclo de vida de los productos, fomentar cambios en el comportamiento de los consumidores, modelos económicos circulares, reducción de la sobreproducción, mayor uso de materiales reciclados y reciclables entre otras (Gatzer ; Helmcke & Roos, 2022).

Dentro de la revisión de estrategias de EC, en la Tabla 1 se mencionan las que se enfocan en la transformación de la industria de la moda y de la cadena de valor, que incluye no solo la forma en que se produce, sino también la forma en que se consume.

En principio, la fundación Ellen MacArthur (2013), ha consolidado estrategias de transformación hacia una EC, desarrollando aportes específicos para la industria de la moda, dentro de las que se destacan las siguientes:

ELIMINACIÓN DE RESIDUOS Y CONTAMINACIÓN

Desde un diseño circular, llamado así al conjunto de prácticas de diseño basadas en los principios de EC. En este propósito se proponen preguntas que estimulan el desarrollo de soluciones diferentes a las convencionales, como por ejemplo ¿cómo entregar productos y experiencias de moda sin producir prendas? ¿Cómo asegurar que no queden excedentes o inventarios? o ¿cómo diseñar productos que utilicen materias primas renovables, seguras o recicladas?

En esta estrategia se combinan tecnologías de información, logística y producción más eficientes, así como un diseño informado que elimina las emisiones potenciales desde la con-

Tabla 1. Resumen de estrategias mundiales de Economía Circular

ESTRATEGIA	FUENTE	AÑO	AUTOR(ES)
- Introducción de requisitos obligatorios de diseño ecológico - Detener la destrucción de productos no vendidos - Eliminar o reducir la contaminación por micro plásticos - Pasaporte digital de productos textiles - Información objetiva y verificable sobre las declaraciones ecológicas de los productos textiles - Impulsar la reutilización y el reciclaje de productos textiles	Estrategia para la circularidad y sostenibilidad de los productos textiles COM 2022 -141	2022	Comisión Europea
- Eliminar contaminación y residuos por medio del diseño circular - Circulación de productos y materiales para mantenerlos en uso - Adoptar prácticas regenerativas para la obtención de materias primas renovables	Diseño Circular para la Moda Modelos de Negocio Circulares Visión de una Economía Circular para la Moda	2021	Fundación Ellen MacArthur
- Repensar la producción por medio del ecodiseño - Rediseñar el consumo, informando y empoderando comunidades y consumidores - Regenerar materiales y productos incentivando la reutilización y el reciclaje	www.refashion.fr	2022	Eco organización Refashion
- Determinar productos con menor impacto ambiental en su ciclo de vida y que presenten mejoras específicas de forma que: - Procedan de fuentes renovables, de formas de agricultura y silvicultura sostenibles - Producción eficiente en el uso de recursos y energía - Libres de sustancia peligrosas y menos contaminantes - Diseño durable e idóneo para condiciones de uso - Empresas socialmente responsables	Criterios ecológicos para la concesión de la Etiqueta Ecológica de la UE a productos textiles	2014	Comisión Europea
- Sistemas de producción y consumo que promueven la eficiencia en el uso de materiales, agua y la energía, teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas - Uso circular de los flujos de materiales. - Extensión de la vida útil de los productos por medio de la innovación tecnológica.	Estrategia Nacional de Economía Circular	2019	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia Ministerio de Comercio, Industria y Turismo de Colombia

cepción del producto. Este último cuenta con proyectos como el rediseño de jeans (Ellen Macarthur Foundation, 2021) o casos como el enfoque de diseño de la marca iCicle para evitar impactos negativos del producto durante su ciclo de vida y facilitar su reciclaje (iCicle, 2023).

CIRCULAR PRODUCTOS Y MATERIALES

Se trata de incrementar el número de veces que los materiales y productos son utilizados a la vez que se exploran nuevas fuentes de crecimiento, en el largo plazo la visión 2050 de la industria propuesta por la fundación muestra un escenario de intercambio o mercado creciente pero un ritmo de producción desacelerado. Lo anterior estimulado por preguntas desde el diseño circular como por ejemplo ¿cómo mantener la integridad física de las prendas? ¿cómo podríamos diseñar negocios y servicios para usar de nuevo prendas gastadas o dañadas? ¿cómo acceder a productos de moda sin necesidad de comprarlos? o ¿cómo diseñar prendas para ser nuevamente utilizadas, fáciles de desensamblar y que sus materiales sean reciclables y sus componentes reutilizados? En esta estrategia en particular cabe mencionar algunas iniciativas como el diseño de materiales a partir de productos obtenidos del reciclaje: como pulpa de celulosa, fibras de algodón o monómeros provenientes de fibras sintéticas, como por ejemplo Econyl (2023) o Circulose (2023).

PRÁCTICAS DE AGRICULTURA REGENERATIVAS Y EL USO DE FUENTES RENOVABLES

Si bien el 60% de las fibras utilizadas provienen de recursos no renovables, el otro 40% se obtiene de fuentes renovables que también causan un impacto negativo en el suelo y el agua, por las prácticas agrícolas tradicionales, que incorporan técnicas insostenibles para la regeneración del suelo como el uso intensivo de plaguicidas y agua. Tal es el caso del cultivo de algodón. Se propone fomentar prác-

ticas sostenibles de agricultura para las fibras de origen natural tanto vegetal, como animal; dentro de las cuales se busca incentivar el uso de suelos biológicamente activos, menores costos de entrada, almacenamiento y tratamiento de agua, alta diversidad de cultivos y ecosistemas locales saludables. Un caso destacado es el de Fibershed, con sede en California, quienes desarrollan y promueven sistemas de agricultura ecológica. Para la obtención de fibras naturales.

Otro referente importante, el cual actualmente está en discusión, es la Estrategia de Circularidad y Sostenibilidad para Productos Textiles en la Unión Europea, publicado en marzo de 2022 por la Comisión Europea, la cual establece las siguientes estrategias:

INTRODUCIR REQUISITOS OBLIGATORIOS DE DISEÑO ECOLÓGICO

Para el 2024 se proyecta establecer unos mínimos criterios de ecodiseño para prendas comercializadas en el mercado europeo, comenzando por aquellas que representan altos volúmenes, dado que la mayoría de los productos se descartan durante el uso, por problemas como: daños en cremalleras, baja solidez del color o baja resistencia al desgarrar, los cuales pueden evitarse desde el diseño de la prenda (ECOS, 2021). También la composición y forma de obtención de los materiales debe contemplar unas mínimas pautas para asegurar su circularidad. Se incluyen además criterios detallados para el diseño de productos duraderos, restricciones a sustancias químicas peligrosas y requisitos para el abastecimiento sostenible de fibras textiles.

La Comisión elaborará requisitos vinculantes de diseño ecológico para productos específicos a fin de aumentar el rendimiento de los productos textiles en términos de: durabilidad, reusabilidad, reparabilidad, reciclabilidad de fibra a fibra y contenido obligatorio de fibras

recicladas, con el fin de minimizar y rastrear la presencia de sustancias peligrosas y de reducir los efectos adversos sobre el clima y el medio ambiente. También se busca eliminar o reducir la presencia de sustancias peligrosas o consideradas carcinógenas, mutagénicas o tóxicas, para los productos comercializados en Europa, a partir de la revisión al marco establecido en el reglamento 1907/2006 del parlamento europeo para el Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de sustancias químicas (REACH). Así como la reducción de emisiones que motiva la construcción de la Directiva sobre Emisiones Industriales (IED, 2021) y la compilación y promoción sobre las mejores técnicas disponibles para la industria textil (Comisión Europea, 2023); este último es un marco de referencia enfocado principalmente a los procesos de acabado y tintorería y la huella hídrica de los procesos textiles.

Cabe mencionar que también la Comisión contempla el uso de sistemas voluntarios como la Etiqueta Ecológica a Productos Textiles (Decisión 2014/350/UE) y los Criterios de contratación pública ecológica de la UE aplicables a los servicios y los productos textiles. El propósito inicial de la estrategia mencionada es prolongar la vida útil de los textiles, promoviendo un diseño técnico que dure más y modelos de negocio circulares como reutilización reparación, alquiler y servicios de recogida y logísticos para el mercado de segunda mano, el cual representa ahorros en los consumidores.

DETENER LA DESTRUCCIÓN DE LOS PRODUCTOS NO VENDIDOS O DEVUELTOS

Se proponen dos líneas de acción al respecto, la primera establecida en el marco de Diseño Ecológico para productos sostenibles, donde se obliga a las marcas y productores a informar públicamente el número de productos no vendidos o devueltos, así como de los procesos posteriores, donde se tramitan prohibiciones para evitar la destrucción de estos por medio de incinera-

ción. La segunda, busca optimizar los niveles de inventario y sistemas de información para evitar la alta tasa de devoluciones del comercio electrónico de ropa y por ende su huella de carbono.

EVITAR LA CONTAMINACIÓN DE MICRO PLÁSTICOS

Teniendo en cuenta que el 60% de las fibras fabricadas son sintéticas y de la presencia de micro plásticos en fuentes de agua (Figura 1), la nueva reglamentación busca establecer requerimientos obligatorios en el diseño de productos o realizar procesos de prelavado industrial controlado y por otro lado exigir requisitos obligatorios a los fabricantes de lavadoras para implementar sistemas que lo eviten, pero en general se requiere profundizar y establecer las causas de las emisiones para poder optimizar las soluciones técnicas adecuadas.

INTRODUCIR REQUISITOS DE INFORMACIÓN Y UN PASAPORTE DIGITAL DE PRODUCTOS

Dado que las diferentes estrategias de circularidad se apoyan en información compartida entre los actores de la cadena de valor. Por ejemplo, las prácticas agrícolas en el origen, la composición de los materiales o la presencia de sustancias peligrosas o contaminantes, se introducirá un Pasaporte digital de productos textiles que permita la trazabilidad por medio de requisitos de información obligatorios sobre circularidad y aspectos medioambientales relevantes.

REVISIÓN DE LAS DECLARACIONES ECOLÓGICAS SOBRE PRODUCTOS VERDADERAMENTE SOSTENIBLES

Actualmente las marcas realizan declaraciones que confunden o brindan información incorrecta a los consumidores, es por eso que desde el mismo concepto de sostenible, debe revisarse y se establecerán pautas y criterios para realizar cualquier declaración ecológica, Por ejemplo es inexacto decir que una prenda contiene fibras

Figura 1. Contaminación de océanos y fuentes de agua (Autoría: SENNOVA).

de poliéster reciclado, cuando este proviene de envases de PET y no de un proceso de reciclaje fibra a fibra desde residuos textiles.

RESPONSABILIDAD AMPLIADA DEL PRODUCTOR E IMPULSO DE LA REUTILIZACIÓN Y RECICLAJE DE LOS RESIDUOS TEXTILES

Dada la eficacia para la gestión de residuos desde la recolección selectiva y su posterior tratamiento acorde con la jerarquía de residuos, esta medida busca el compromiso responsable de los productores para lograr mejorar la baja tasa de reciclaje y aprovechamiento de los productos textiles. A partir del 1 de enero de 2025, es obligatorio realizar la recogida selectiva conforme con la legislación europea vigente.

Otro referente fundamental en EC es el eco organización de productos textiles, ropa para el hogar y calzado de Francia ECO TLC, hoy denominada Refashion, esta organización impulsa las siguientes estrategias:

- **Proveer herramientas, servicios e información:** Para acelerar los procesos de transformación de la industria y conectar a los actores de la cadena de valor.
- **Crear plataformas:** Para afianzar el conocimiento de los profesionales de la industria y consumidores sobre innovación, ecodiseño y reciclaje por medio de documentos compartidos, cifras y estudios realizados.
- **Incentivar la eco concepción de productos textiles:** Por medio de herramientas como análisis de ciclo de vida de productos, fibras textiles y tecnologías de reciclaje.
- **Incentivar el reciclaje textil:** Por medio de una plataforma creada para informar y conectar tanto a operadores como transformadores, además de publicar estudios que establecen pautas y criterios de selección de residuos o de clasificación para su aprovechamiento.

Dentro de los estudios publicados para fomentar el reciclaje textil, Refashion ha identificado los factores disruptores y facilitadores para los diferentes canales de reciclaje, que aportan criterios para la selección y clasificación de los residuos textiles, que en la práctica son relevantes para la implementación de procesos de reciclaje en empresas de confección.

Por último, la Estrategia Nacional de Economía Circular, propone explorar diferentes modelos de negocio para lograr la transformación de los sectores productivos, incentivando:

- **Modelos de Valorización de Residuos:** Residuos utilizados en aplicaciones diferentes, por ejemplo: compostaje de residuos (energía), reciclaje de envases o incluso se podría contemplar el uso de textiles en circuitos abiertos de reciclaje como en la fabricación de filtros.
- **Modelos Circulares (fibra a fibra):** Materiales usados en la misma aplicación, como por ejemplo el algodón con contenido reciclado.
- **Modelos de extender la vida útil:** Rediseño de productos y productos de menor impacto, por ejemplo, envases retornables, energías renovables, ropa de mejor calidad y atemporal.

- **Modelos de productos como servicios:** Servicios ofrecidos para compartir productos entre usuarios, alquiler de ropa, ropa de segunda mano
- **Modelo de plataforma:** Uso de plataforma para optimizar sistemas, por ejemplo, trazabilidad de los materiales, sistemas de recolección, etc.

TECNOLOGÍAS DE RECICLAJE TEXTIL

Se entiende por reciclaje a la acción de reprocesar un material o componente que ha sido previamente procesado para su inclusión en un producto (Figura 2). En el reciclaje textil, este proceso puede ser mecánico, térmico o químico (Duhoux, 2021).

RECICLAJE MECÁNICO

El reciclaje mecánico es un proceso basado en fuerzas físicas, que puede utilizarse de forma aislada para el reciclado de tejidos o fibras o como parte del proceso en las técnicas de reciclado termo mecánico o químicos y bioquímicos (Duhoux et al, 2021). Las principales etapas del reciclaje mecánico consisten en un acondicionamiento en el que el producto textil es desmontado y cortado a un tamaño adecuado, seguido de un conjunto de acciones mecánicas

Figura 2. Categorización de tecnologías de reciclaje de polímeros y fibras textiles, según la Comisión Europea, 2023.

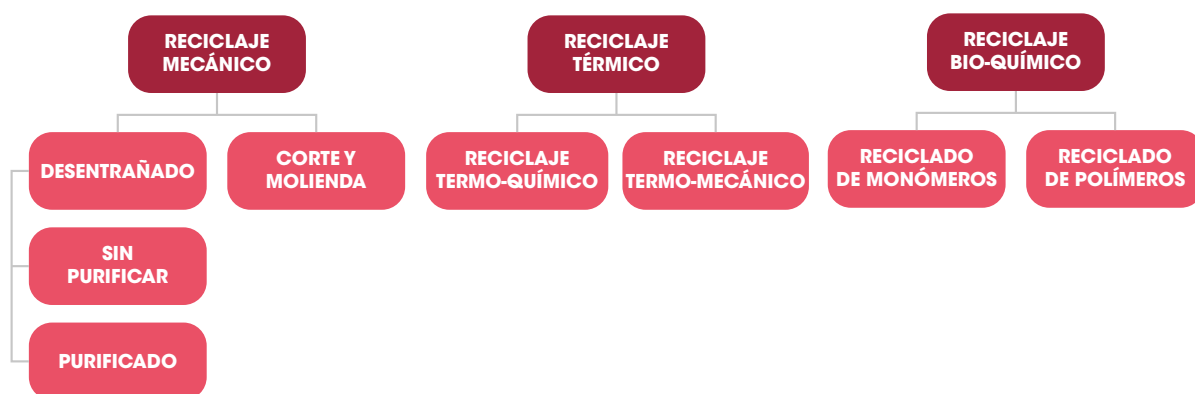


Figura 3. Representación esquemática del proceso de reciclaje mecánico de polímeros. Basado en K.Bhanderi, et al. 2023.



que desfibran el textil, provocando la apertura de la estructura y la liberación de las fibras individuales (Figura 3). Sin embargo, las acciones específicas necesarias para obtener un resultado utilizable dependen en gran medida del tipo, la estructura y el tamaño del producto textil que se utiliza como entrada (Sun et al, 2022).

Básicamente, todo tipo de residuo textil puede ser procesado mediante reciclaje mecánico. Sin embargo, el tipo de fibra (es decir, sintética o natural, mezclas, fibras técnicas, etc.) en combinación con la estructura textil (es decir, la torsión del hilo y la construcción del tejido) determina la maquinaria necesaria y la producción potencial. Por ejemplo, las fibras de aramida (por ejemplo, Kevlar) son muy duraderas y se necesita maquinaria especializada, ya que las máquinas normales se dañarían al procesar un material tan resistente.

Durante el reciclado mecánico se conservan algunas propiedades generales de las fibras

como el contenido de material y el color, y debido al proceso de desgarrado, los materiales pueden sufrir daños que conllevan a una importante reducción de la longitud de la fibra en comparación con las fibras vírgenes. Esto significa que la calidad del resultado depende tanto del material de entrada como del proceso de reciclaje (Ribul et al, 2021). Cuanto mejor se adapte el proceso al material de entrada, mayor será la calidad de las fibras resultantes. El proceso produce una variedad de longitudes de fibra, incluyendo fibras hilables, una parte considerable de fibras cortas y polvo. También puede haber trozos de tejido e hilos, en cuyo caso el material requiere otra (o varias) pasada por la máquina de desgarrado para obtener fibras individuales.

La fracción de fibras hilables, suficientemente largas como para volver a ser hiladas, se encuentra entre el 5 y el 20% de la materia textil de entrada en el caso de las fibras naturales

(por ejemplo, el algodón) y del 25 al 55% de la materia textil de entrada en el caso del poli algodón o el poliéster.

Por lo general, se prefieren las fibras de más de 15 mm de longitud, aunque fibras entre 10 y 15 mm pueden ser hilables, sin un aporte significativo a la resistencia del hilo. Las fibras cortas generadas durante el proceso son conocidas como pelusa y aunque por su tamaño no pueden ser utilizadas en un proceso de hilado, se utiliza normalmente en la industria de los no tejidos para fabricar productos de relleno como aislamiento para la industria de la construcción o automotriz. La desintegración de la fibra durante el proceso de reciclaje produce material en polvo que se utiliza como combustible, pero también podría servir potencialmente como materia prima para un proceso de viscosa que dé lugar a una fibra de tipo viscosa o como relleno o refuerzo en plásticos y materiales compuestos (Duhoux et al, 2021).

En la Tabla 2 se presentan las principales ventajas y desventajas del reciclado mecánico.

RECICLAJE TÉRMICO

Se considera un proceso de reciclaje basado en el calentamiento con el objetivo de recuperar polímeros o bloques de construcción de bajo peso molecular. Existen procesos termo mecánicos y termoquímicos (es decir, gasificación, pirólisis, craqueo). El proceso termo mecánico se limita a fundir el polímero, manteniendo las cadenas intactas, mientras que el proceso termoquímico las descompone en bloques de construcción de bajo peso molecular (Duhoux et al, 2021).

RECICLAJE TERMO MECÁNICO

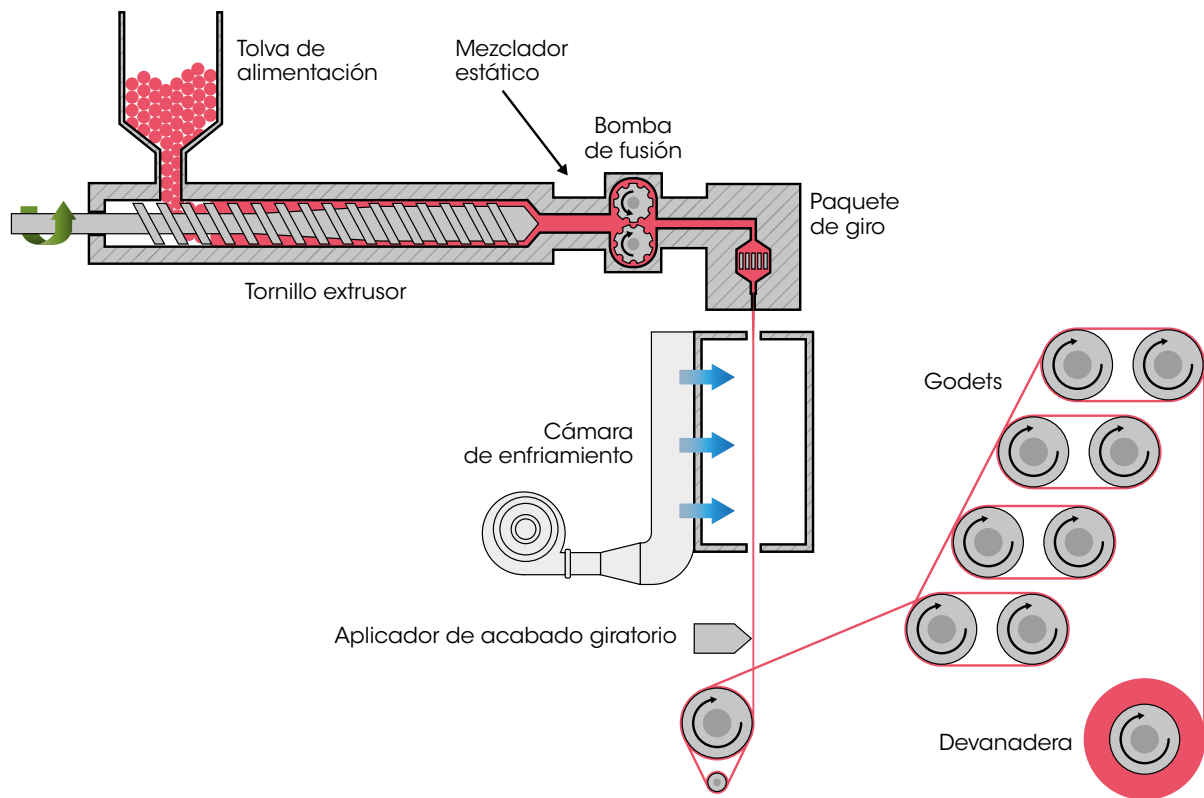
En el proceso termo mecánico se funden las fibras sintéticas termoplásticas y se recupera en forma de pellets o fibras (Figura 4). Este se utiliza para fibras sintéticas puras como el nailon 6, el poliuretano termoplástico, el elastano y la poliamida 6, sin embargo, las propiedades de las fibras de elastano rehiladas demuestran rotura, a menos que se transforme en formas sólidas como barras. A pesar de que este proceso es tec-

Tabla 2. Ventajas y desventajas del reciclaje mecánico.

Fuente: Duhoux et al, 2021 & Ribul et al, 2021.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Menor inversión y espacio	Se generan fibras textiles de una calidad muy inferior a la de las fibras vírgenes y a material no fibroso que no es apto para la producción textil sin un procesamiento posterior
Personal menos calificado	Es muy difícil obtener un color uniforme cuando se obtienen diferentes colores de fibras como resultado
Puede procesar cualquier tipo de residuo	Es posible que el material de fibra del textil reciclado anteriormente se quede en el equipo de reciclaje y contamine los futuros lotes de producción
En fibras naturales constituye el único método que preserva el tipo de fibra natural	
Se pueden procesar cantidades relativamente pequeñas de material de desecho	

Figura 4. Esquema del proceso de hilado por fusión. Basado en Hufenus, et al. 2020.



nológicamente viable y constituye una solución prometedora para el reciclaje del poliéster, todavía no se ha escalado a nivel industrial debido a los elevados costos que implica la eliminación de contaminantes, excepto en ejemplos comerciales limitados como las fibras de la empresa japonesa Teijin (Ribul et al, 2021)

Es importante que el material de entrada esté formado por un solo tipo de polímero o por tipos de polímeros compatibles. Los polímeros incompatibles no se mezclan correctamente, lo que causa problemas en el procesamiento, dando lugar a fibras de menor resistencia que impiden la producción de fibras. Otros contaminantes como los pigmentos, las impresiones, los residuos de lavado, los retardantes de llama, los revestimientos, etc., que están presentes en la fibra o el textil, pueden obstaculizar el proceso de hilado y/o dar

lugar a una calidad de salida muy reducida. Por ejemplo, algunos productos (como los retardantes de llama) pueden provocar la hidrólisis de la cadena polimérica, lo que da lugar a una reducción de la viscosidad. Además, la mezcla de materiales de diferentes colores puede dar lugar a colores no deseados, ya que los tintes y pigmentos siguen presentes. Por lo tanto, el conocimiento de la composición, el tipo y la cantidad de contaminación y la separación y clasificación del material de entrada son extremadamente importantes (Duhoux et al, 2021). En la tabla 3 se presentan las principales ventajas y desventajas del reciclado termo mecánico.

RECICLAJE TERMOQUÍMICO

Proceso de reciclaje que utiliza la reacción de oxidación parcial de los polímeros para producir componentes de baja masa molar o el

Tabla 3. Ventajas y desventajas del reciclaje termo mecánico

VENTAJAS	DESVENTAJAS
El proceso es similar al procesamiento por fusión del material virgen	Las propiedades del polímero/fibra se deterioran después de cada ciclo
Hay pocas emisiones que puedan surgir durante el proceso, sólo los contaminantes volátiles	La tecnología es muy sensible incluso a niveles bajos de contaminación y al estado (masa molar/viscosidad) del polímero.
	Dado que los colorantes permanecen en el material polimérico, generalmente sólo son posibles los colores oscuros.

Tabla 4. Ventajas y desventajas del reciclaje termoquímico

Ventajas	Desventajas
Capacidad de procesar flujos de residuos más complejos y heterogéneos. No necesita residuos textiles clasificados de alta calidad	Consume mucha energía debido a las altas temperaturas de procesamiento
La gasificación es menos sensible a la degradación del material	Mayor impacto ambiental comparado con el reciclaje mecánico y termo mecánico
La tecnología da lugar a materias primas puras, no contaminadas y vírgenes	
El gas de síntesis obtenido tiene muchas posibilidades de aplicación en reacciones de síntesis química que dan lugar a toda una gama de productos deseables	

calor para degradar los polímeros a monómeros que pueden utilizarse como materia prima para la industria química, con la exclusión de los combustibles utilizados para la producción de energía u otros procesos de combustión o recuperación de energía (Duhoux et al, 2021).

Los procesos de reciclaje termoquímico de pirólisis y gasificación difieren entre sí de la combustión en varios aspectos. La combustión se realiza a temperaturas entre 800 y 1200°C con suficiente oxígeno para oxidar completamente el material y se utiliza principalmente para generar vapor para la producción de electricidad o para la calefacción. Por lo tanto, no se

considera un proceso de reciclaje/recuperación de materiales. La gasificación se produce normalmente a 700-1100°C con suficiente oxígeno o vapor para lograr una oxidación parcial y la pirólisis a 350- 700°C en ausencia de oxígeno. Los productos de salida (gas y aceite) generados por la gasificación y la pirólisis se pueden utilizar para fines de calor y electricidad, sin embargo, con los pasos posteriores de purificación también se pueden convertir en productos químicos intermedios y, por lo tanto, servir como materia prima para la industria química. En la tabla 4 se presentan las principales ventajas y desventajas del reciclado termo mecánico.

RECICLAJE QUÍMICO

El reciclaje químico ofrece oportunidades sustanciales para mantener los materiales en un circuito cerrado. En este proceso se utiliza la disolución o las reacciones químicas que se emplean en el reciclado de polímeros (sistema para desmontar las fibras usadas, extraer los polímeros y volver a hilarlos para nuevos usos) o en el reciclado de monómeros (sistema para descomponer los materiales textiles poliméricos en sus monómeros constituyentes y reconstruir las fibras poliméricas para nuevos usos). Existen varias posibilidades dentro de esta tecnología de reciclaje y se pueden identificar dos tecnologías principales al respecto, el reciclaje de polímeros y el reciclaje de monómeros (Ribul et al, 2021).

RECICLADO DE MONÓMEROS

En el reciclado de monómeros, la cadena polimérica se descompone para obtener monómeros. Estos monómeros se separan y purifican antes de volver a entrar en el proceso de polimerización para producir nuevos polímeros de calidad virgen (Duhoux et al, 2021). Este proceso se ha adoptado para transformar diferentes tipos de residuos textiles en fibras. Un ejemplo de ello es la fibra ECONYL, que se fabrica a partir de la poliamida 6 (PA6) de alfombras y redes de pesca desechadas. El reciclaje del plástico PET

(Tereftalato de polietileno) en fibras textiles se ha establecido utilizando diferentes métodos químicos (Ribul et al, 2021).

Los polímeros de PA6 y PET contienen grupos funcionales que pueden ser escindidos por determinados reactivos que también actúan como disolventes de la reacción. Este tipo de reacciones químicas en las que el disolvente es uno de los reactivos y está presente en gran exceso, se denominan reacciones de solvólisis. Los disolventes aplicados suelen ser agua (hidrólisis), alcoholes (metanólisis) o glicoles (glicólisis). En la práctica, la PA6 se despolimeriza generalmente mediante hidrólisis ácida o mediante glicólisis mientras que para el PET se utilizan los tres mecanismos de reacción (Duhoux et al, 2021).

RECICLADO DE POLÍMEROS

En el reciclado de polímeros, la fibra se descompone mediante procesos mecánicos como la trituración, seguida de una disolución química con disolventes específicos a menudo peligrosos. El polímero se conserva y las fibras se regeneran y se hilan. Las fibras celulósicas, como el algodón, pueden reciclarse químicamente mediante un proceso de despulpado. Este proceso puede clasificarse como reciclaje de polímeros, ya que la cadena de celulosa no se descompone a nivel de monómero (es decir, glucosa), aunque puede degradarse parcialmente [(Duhoux et al,

Tabla 5. Ventajas y desventajas del reciclaje químico

VENTAJAS	DESVENTAJAS
El material reciclado puede purificarse y separarse para obtener un polímero puro e incoloro de buena calidad o incluso virgen	El costo del proceso es similar al correspondiente proceso de producción a partir de material virgen
Es la única opción para los polímeros degradados o contaminados y las fibras muy dañadas si no pueden ser procesadas por otras tecnologías	Los procesos de reciclado químico tienen el mayor impacto ambiental debido a los aditivos/productos químicos/solventes necesarios en los procesos de disolución o de repolimerización
El reciclaje químico puede restaurar el polímero	Las mezclas de materiales son menos deseables, excepto el poliéster/algodón

Tabla 6. Resumen de las tecnologías de reciclaje usadas en diversos tipos de textiles Fuente: Lu et al, (2023)

MATERIAL DE ENTRADA	TECNOLOGÍA DE RECICLAJE	PRODUCTO DE SALIDA	PORCENTAJE APROVECHADO (%)	USOS
Algodón	Mecánico	Fibras hilables	5 - 20	Fibras de algodón virgen
		Pelusa	NR	Industria de los no tejidos
		Materiales de relleno/ polvo	NR	Material de relleno Refuerzo en compuestos de material artificial Incinerado – recuperación de energía
	Químico – reciclaje de polímeros	Pasta de celulosa	90 %	Fibras celulósicas artificiales Nano celulosa
Poli algodón	Mecánico	Fibras hilables	25 – 55 %	Fibras de poli algodón virgen
		Pelusa	NR	Industria de los no tejidos
		Materiales de relleno/ polvo	NR	Material de relleno Refuerzo en compuestos de material artificial Incinerado – recuperación de energía
	Químico	Pasta de celulosa o fracción de algodón	NR	Pasta de madera Hilado húmedo
		Fracción de PET o monómeros	NR	Energía Monómeros de origen fósil
	Bioquímico – reciclaje enzimático	Fibras de PET	41 %	Textil
		Polvo de celulosa	18 %	
		Jarabe de glucosa	41 %	Plásticos, tensoactivos, productos químicos
Poliéster	Mecánico	Fibras hilables	55%	Fibras de PET
		Pelusa	NR	Industria de los no tejidos
		Materiales de relleno/ polvo	NR	Material de relleno Refuerzo en compuestos de material artificial Incinerado – recuperación de energía
	Termoquímico	Pequeñas moléculas de gas, gases, petróleo, alquitrán - CO, CO ₂ , H ₂ y CH ₄	74%	Combustibles Fibras textiles
	Termo mecánico	Pellets de PET		Hilo textil de poliéster Fibras de PET
	Químico – Reciclaje de monómero	Ácido tereftálico (TA) Monoetilenglicol (MEG) Dimetiltterefalato (DMT) Tereftalato de bishidroxietileno (BHET)	90%	Polimerización para obtener PET de alta pureza y grado virgen

★ No reporta

2021). El proceso de lyocell se ha adaptado para el desarrollo de fibras a partir de residuos de pre-consumo y postconsumo añadidos a la pulpa de madera y prendas de residuos de algodón con y sin pulpa de madera (Ribul et al, 2021).

El producto final consiste en pulpa de celulosa húmeda o semiseca que, dependiendo de la tecnología, puede mezclarse con pulpa de madera y procesarse en procesos de hilatura tradicionales para obtener fibras de celulosa regenerada. En algunos casos, la pulpa no se utiliza inmediatamente, sino que se seca y se le da forma de hojas para su almacenamiento y transporte a una empresa de hilatura. El proceso produce pocos residuos, que se originan sobre todo en las contaminaciones y en las fibras no algodóneras presentes en los textiles (Duhoux et al, 2021). En la tabla 5 se presentan las principales ventajas y desventajas del reciclado químico.

RECICLAJE POR COMPOSICIÓN TEXTIL

En la Tabla 6 se resumen las tecnologías de reciclaje usadas de acuerdo con el tipo de textil. El algodón es una de las materias primas más comunes en la industria textil y es la fibra más consumida después del poliéster. Por lo tanto, los desechos de algodón también son uno de los desechos textiles más comunes, y actualmente, los métodos de reciclaje de estos consisten en reciclaje mecánico y químico (Lu et al, 2023).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bhanderi, K. K., Joshi, J. R., & Patel, J. V. (2022). Recycling of polyethylene terephthalate (PET or PETE) plastics—an alternative to obtain value added products: a review. *Journal of the Indian Chemical Society*, 100843. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100843>.
- Chaka, K. T. (2021). Beneficiation of textile spinning waste: Production of nonwoven materials. *Journal of Natural Fibers*, 19(14), 9064–9073. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1982437>.
- Chopra, S. S., Liang, D., Kaur, G., Lens, C., & Lin, C. S. K. (2022). Sustainable process design for circu-

lar fashion: Advances in sustainable chemistry for textile waste valorisation. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, vol. 39 p 100747. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100747>

Circulose (2023). Is a new material made by recycling cotton from worn-out clothes and production waste? *It makes fashion circular*. <https://circulo.se/en/>

Comisión Europea. (2023). *Best available techniques (BAT) reference document for the Textiles Industry*. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC131874>

CONCLUSIONES

Como se proyecta en países y mercados que se suscriben a los objetivos climáticos y de acuerdo con la jerarquía para la gestión de residuos sólidos, todo comienza en la posibilidad de reutilizar y mantener en uso productos y materiales. Es por ello, que para entender los diferentes escenarios para aprovechamiento de los residuos textiles, primero es necesario conocer los diferentes actores y funciones en la cadena de valor textil en Colombia.

Sin embargo, de acuerdo a lo expuesto, el reciclaje mecánico es una alternativa de estrategia circular a desarrollarse en Colombia, porque permite la preparación de subproductos que serán aprovechados por otras empresas, en él se generan recortes pequeños, fibras, hilo, pelusa y polvo, los cuales son insumo para otros procesos posteriores de transformación.

- De Ponte, C., Liscio, M. C., & Sospiro, P. (2023). State of the art on the Nexus between sustainability, fashion industry and sustainable business model. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, Vol. 32, p 100968. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.100968>
- Duhoux, T., Maes, E., Hirschnitz-Garbers, M., Peeters, K., Asscherickx, L., Christis, M., ... & Sachdeva, A. (2021). Study on the technical, regulatory, economic and environmental effectiveness of textile fibres recycling. *European Commission Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs*, 10, 828412.
- Ecós (2021) *Durable, repairable and mainstream - How ecodesign can make our textiles circular* - ECOS Webinar | 20 April 2021. <https://policycommons.net/artifacts/3330044/durable-repairable-and-mainstream/4128854/>
- Econyl (2023). *Endless Possibilities*. regenerated nylon. <https://www.econyl.com/discover-econyl/>
- Ellen Macarthur Foundation. (2013). *Circular Economy*. <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/>
- Ellen Macarthur Foundation. (2021). *The Jeans Redesign*. <https://ellenmacarthurfoundation.org/the-jeans-redesign>
- Gatzer, S.; Helmcke, S.; and Roos, D. (2022). *Playing offense on circularity can net European consumer goods companies €500 billion, McKinsey and Company*. <https://www.mckinsey.com/industries/consumer-packaged-goods/our-insights/playing-offense-on-circularity-can-net-european-consumer-goods-companies-500-billion-euros> (accessed Nov. 20, 2022).
- Icicle (2023). *Icicle group*. <https://www.icicle.com.cn/en/icicle-group/>
- Industrial Emissions Directive (IED) (2021). *Assessment of options for the revision of the Industrial Emissions Directive*. EC. Diciembre 2021. <https://environment.ec.europa.eu/topics/industrial-emissions-and-safety/industrial-emissions-directive>
- Leff, E. (2022). *Racionalidad ambiental: la reapropiación social de la naturaleza*. Siglo XXI Editores México.
- Lu, L., Fan, W., Meng, X., Xue, L., Ge, S., Wang, C., & Lam, S. S. (2023). Current recycling strategies and high-value utilization of waste cotton. *Science of The Total Environment*, 856, 158798. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158798>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU), *Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (UNFCCC), 12 Diciembre 2015, disponible en esta dirección: <https://www.refworld.org/es/docid/602021b64.html> [Consulta: 27 Octubre 2023]
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2019). El costo ambiental de estar a la moda. *Noticias ONU*, 2019. <https://news.un.org/es/story/2019/04/145820194161> [Consulta: 25 de Noviembre del 2022].
- Schmutz, M., & Som, C. (2022). Identifying the potential for circularity of industrial textile waste generated within Swiss companies. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 182, p. 106132. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106132>.
- Suhaimi, N. A. S., Muhamad, F., Abd Razak, N. A., & Zeimaran, E. (2022). Recycling of polyethylene terephthalate wastes: A review of technologies, routes, and applications. *Polymer Engineering & Science*, 62(8), 2355-2375. <https://doi.org/10.1002/pen.26017>
- Todor, M. P., Rackov, M., Kiss, I., & Cioata, V. G. (2022, February). Composite solutions with recycled textile wastes. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2212, No. 1, p. 012030). IOP Publishing.
- Sun, X., Zhang, X., Jiao, X., Ma, J., Liu, X., Yang, H., ... & Jin, W. (2022). Injectable bioactive polymethyl methacrylate-hydrogel hybrid bone cement loaded with BMP-2 to improve osteogenesis for percutaneous vertebroplasty and kyphoplasty. *Bio-Design and Manufacturing*, 5(2), 318-332. <https://doi.org/10.1007/s42242-021-00172-1>.
- Ribul, M., Lanot, A., Pisapia, C. T., Purnell, P., McQueen-Mason, S. J., & Baurley, S. (2021). Mechanical, chemical, biological: Moving towards closed-loop bio-based recycling in a circular economy of sustainable textiles. *Journal of Cleaner Production*, 326, 129325. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129325>.
- United Nations Climate Change (UNFCCC) (2021). *Fashion Industry Charter for Climate Action. Industry Charter Fashion and Climate Action*, 2021. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/IndustryCharterFashionandClimateAction-22102018.pdf> (accessed Nov 24, 2022).