

Capítulo 1 Análisis de la sustentabilidad energética del proceso de reciclado de PVC de alfombra modular

Chapter 1 Energy sustainability analysis of the recycled PVC from carpet

DURAN-GARCIA, Maria Dolores†*, JUAREZ-MICHUA, Joanna y SANCHEZ-POZOS, Miriam

Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ingeniería.

ID 1^{er} Autor: *Maria Dolores, Duran-Garcia* / **ORC ID:** 0000-0003-3584-4783

ID 1^{er} Coautor: *Joanna, Juarez-Michua* / **ORC ID:** 0000-0001-9099-5141

ID 2^{do} Coautor: *Miriam, Sanchez-Pozos*

DOI: 10.35429/H.2019.2.1.16

M. Duran, J. Juarez y M. Sanchez

mddurang@uaemex.mx

A. Marroquín, J. Olivares, P. Diaz y L. Cruz. (Dir.) La invención y las mujeres en Mexico. Handbooks-©ECORFAN-Mexico, Querétaro, 2019.

Resumen

Debido al gran crecimiento de la población mundial y al incremento en el nivel de vida en general se ha incrementado de manera importante el empleo de fibras textiles sintéticas en las últimas décadas. En este sentido, el presente artículo permite mostrar un análisis de la sustentabilidad energética del proceso de producción de alfombras y las perspectivas que tienen el proceso de reciclado de la misma en México; enfocándose principalmente en el reciclado de PVC. Este trabajo está enmarcado en un proyecto Conacyt-INOVAPYME en el cual se propone un proceso innovador de reciclado de algunos componentes de alfombras. Se realiza un análisis de los antecedentes sobre el proceso de reciclado de alfombras y textiles a nivel mundial y en los Estados Unidos, con el fin de mostrar el potencial y ahorro que genera el reciclado de algunos compuestos como el PVC, Nylon, poliéster y fibras sintéticas. Asimismo, se realiza un análisis sobre el consumo de energía y agua de la producción de alfombra con materiales vírgenes y el proceso de reciclado. Con el fin de presentar un contexto y mostrar la viabilidad del proceso. Finalmente se toman algunos criterios para obtener conclusiones respecto a la sustentabilidad del proceso.

Reciclado, Alfombra, Sustentabilidad energética, PVC

Abstract

Due to the great growth of the world population and the increase in the standard of living in general, the use of textile fibers has increased significantly in recent decades. In this context, this article allows to show an analysis of the sustainability of the carpet production process and the perspectives that have the process of recycling it in Mexico, focusing mainly on PVC recycling. This paper is one of the results of one CONACYT-PEI Project, in which its objective is the design of a carpet recycling process in Mexico. In order to show the potential and savings generated by the recycling of some compounds such as PVC, Nylon, polyester and synthetic fibers, an analysis of the background on the process of recycling of carpets and textiles worldwide and in the United States is performed. Likewise, an analysis is carried out on the energy and water consumption of carpet production with virgin materials and the recycling process. In order to present a context and show the viability of the process. This document is focused particularly in the recycling process of the carpet backing. Finally, some criteria are taken to obtain conclusions regarding the sustainability of the process.

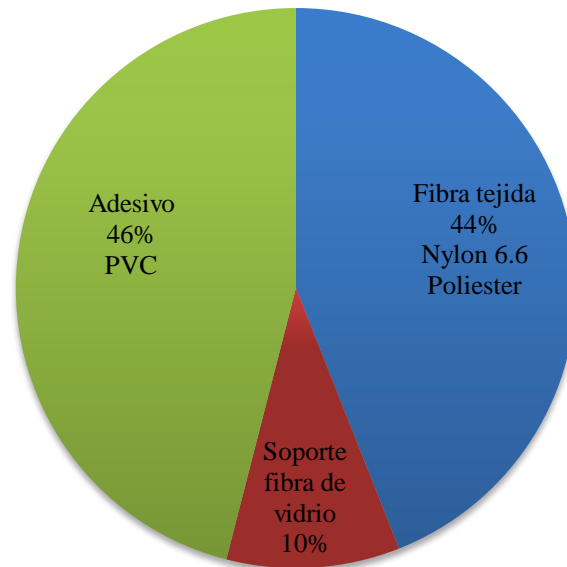
Carpet recycling, Energetic sustainability, PVC

1. Introducción

Resulta difícil indicar desde qué año exactamente comenzó la fabricación artesanal de alfombras, ya que estas estaban confeccionadas con material degradable como seda, lana y algodón. Sin embargo, algunos arqueólogos indican que se han hallado alfombras que datan desde los primeros siglos de la era cristiana. Las primeras de ellas eran todas hechas a mano, de origen persa o turco; eran elementos decorativos muy valiosos y principalmente ornamentales.

La técnica de tejer y anudar alfombras fue desarrollándose a lo largo de los años y los motivos se hicieron más detallados. Posteriormente, las alfombras se volvieron artículos más comunes, principalmente desde que comenzó su comercialización en Europa, lo que hizo necesario que poco a poco se industrializara el proceso de producción de tal modo que ahora es totalmente automatizado. De la misma forma, las materias primas fueron cambiando, actualmente una alfombra comercial está compuesta principalmente por fibras sintéticas. Particularmente la alfombra modular consta normalmente de 4 capas: la cara principal de fibras tejidas, el soporte primario de fibra de vidrio, el adhesivo y el soporte secundario de fibra de vidrio. En la cara principal se utilizan fibras sintéticas, principalmente nylon, poliéster, PET, viscosa, lana, polipropileno, algodón, yute. El soporte principal que es el que mantiene unida la fibra está compuesto de fibra de vidrio y un elastómero que funciona como adhesivo y que generalmente es PVC o SBR (estireno-butadieno) (The Carpet and Rug Institute, 2003). El porcentaje de los componentes de la alfombra modular se muestra en la figura 1.1.

Figura 1.1 Componentes de la alfombra comercial



Fuente: (Vaidyanathan et al. 2013)

Como puede observarse, las alfombras están compuestas de diversos materiales cuya obtención tiene un alto impacto ambiental y energético. Asimismo, la deposición de los residuos de estas, tiene un alto impacto porque, a diferencia de las de la antigüedad, son materiales compuestos difíciles de separar y reprocesar para su reciclado, además de no ser biodegradables y provocar serios problemas ambientales.

Uno de los componentes principales del adhesivo de la alfombra modular es el PVC, este polímero es uno de los materiales plásticos que más se producen en el mundo, su producción tiene un alto consumo energético y, al igual que la mayoría de los materiales plásticos, es muy difícil de degradar y genera una gran cantidad de residuos persistentes.

En este sentido, el reciclado es una excelente opción para disminuir este tipo de residuos, así pues, el presente trabajo muestra un análisis de la sustentabilidad del proceso de reciclado de alfombra, enfocándose principalmente en el análisis de sustentabilidad energética del reciclado del PVC. Presenta algunos antecedentes de este proceso en otros países y sus beneficios medioambientales y económicos y está enmarcado en una propuesta de proyecto PEI-CONACYT para la instalación de una planta de reciclado de alfombras en Toluca. Por la razón antes expuesta no se presenta el diseño del equipo propuesto para el reciclado, sin embargo se analiza el consumo energético de su proceso con el fin de realizar una comparativa con la producción de PVC virgen.

Es importante destacar que actualmente no existe un proceso comercial de reciclado de alfombras en México, estas se desechan una vez que han cumplido su periodo de uso (5 a 11 años aproximadamente), por esta razón se considera muy importante el resultado de este proyecto de investigación.

A lo largo del presente capítulo se explicarán primeramente los antecedentes de procesos de reciclado de alfombra que existen en el mundo y en el País, esto servirá para justificar y documentar esta investigación. Posteriormente se describirá la metodología empleada para analizar la sustentabilidad energética del reciclado de PVC de la alfombra modular y finalmente se describirán los resultados en cuanto a ahorro de energía e impacto ambiental del proceso.

2. Antecedentes

2.1. Contexto Internacional

En este nuevo milenio, muchas compañías, principalmente en U.S, Europa y Japón han respondido a los retos presentados por el calentamiento global adoptando compromisos de sustentabilidad.

Se pueden observar en el mercado, procesos sustentables, productos sustentables, etc. Estos programas incluyen deposición de residuos, nuevos materiales, ahorro de energía y reciclado.

Sin embargo, para que un producto sea realmente sustentable, debe considerar aspectos, económicos, ecológicos, ambientales, atender perspectivas de consumo de recursos y creación de valor y considerar la deposición de residuos una vez que termina el ciclo de vida de los productos. (Fiksel, et.al. 1999).

La industria de las alfombras, no puede ser la excepción, las alfombras tienen un promedio de vida útil de 5 a 11 años antes de ser retiradas (Mihut, et. al. 2001). Tan solo en los E. U., 4 millones de toneladas se tiran a los vertederos cada año, mientras que en Europa 1.6 millones de toneladas. En el año 1998 en Europa se fundó la CRE (Carpet Recycling Europe) y en 2002, en U. S. se creó la CARE (Carpet America Recovery Effort), se trata de asociaciones civiles formadas de empresas relacionadas con la producción de alfombras y sus componentes, creada con el fin de buscar soluciones para la deposición y reciclado de los materiales que conforman las alfombras. (CARE, 2017).

Desde que CARE fue fundada, sus miembros han logrado recolectar y procesar más de 3.63 miles de millones de libras brutas de alfombras desechadas en los Estados Unidos. Esto es equivalente a 56498mTCO₂E usando el modelo EPA-WARM y la energía ahorrada es la suficiente para proveer 16736 casas en el año, esto es 323,852 barriles equivalente de petróleo. (CARE, 2017)

La cantidad de alfombra recolectada en U. S. equivale a un porcentaje promedio de material reciclado de 14.2%, los principales materiales que se reciclan, son Nylon, PVC, resina, PET, entre otros.

Actualmente, la empresa Shaw Industries Group, que es la empresa productora de alfombras más grande del mundo, posee un sistema de recolección en reciclado de alfombra muy amplio. Ha invertido más de 20 millones de dólares en este programa y ha reciclado más de 700 millones de libras desde alfombra desde que comenzó su programa en el año 2006. Esto ha permitido reducir notablemente costos de materia prima ya que tiene su propio proveedor de nylon y poliéster y actualmente certifica que el 60% del contenido de sus alfombras es reciclado.

Particularmente el presente trabajo se enfoca al reciclado del soporte trasero de la alfombra modular, que en su mayoría está compuesta por PVC y adhesivo. Se enfoca a este componente debido a que se trata de una de las materias primas que se recicla con mayor facilidad y con un bajo costo y consumo energético.

Se decidió trabajar sobre el reciclado de este material debido a que la mayoría de los trabajos analizados refieren el reciclado de residuos plásticos, como es el reciclado del PET y de PVC rígido empleado en construcción de ventanas, no indican nada acerca del reciclado de PVC de alfombra o loseta vinílica. (Al-Salem et. al., 2009).

De hecho sólo algunos autores como Realf y Saunders (2005) analizan la sustentabilidad del reciclado de recubrimientos para piso y otros trabajos como el informe presentado Wrap A.C. (2013) analizan la sustentabilidad y el impacto ambiental del proceso de producción de alfombra.

Por otro lado, algunos estudios como el de (L. Ye et. al, 2016), utilizan el método de análisis de ciclo de vida para evaluar el impacto ambiental del PVC primario y reciclado, y llegan a resultados bastante alentadores. Algunos autores como (Wu et.al. ,2010) concluyen que el consumo energético de la producción de PVC virgen es 3 veces mayor que el que se tiene al reciclar este material mientras que las emisiones son prácticamente el doble. De la misma manera, existen algunos estudios enfocados al análisis del proceso de reciclado de Nylon 6.6 y en ellos se concluye que se pueden tener ahorros de energía hasta de un 30% (Bird, 2014).

2.2. Antecedentes en México

En México, debe reconocerse que el reciclado de Materiales Plásticos es una realidad, y tiene probada su sustentabilidad, ejemplo de ello es PETSTAR planta de reciclado de envases de PET ubicada en Toluca, Edo.

De México que es la empresa más grande de reciclado de este material en grado alimenticio en el País y en América Latina.

Sin embargo, algunos documentos como el del Instituto Nacional de Recicladores (2014), señalan que en nuestro País se recicla solamente el 11% de los plásticos, existiendo aproximadamente 150 empresas dedicadas a estos procesos. Esto hace ver la falta de incentivos públicos y lo poco que se ha explotado en este mercado, más aun considerando que los plásticos reciclados son una gran opción si se busca el ahorro de costos, debido a que el proceso de reciclaje sólo utiliza 20% de la energía que se utiliza para materia prima virgen.

Particularmente, se observa que en materia de reciclado de PVC y Nylon se ha realizado muy poco trabajo, existiendo únicamente una empresa dedicada al reciclaje de Nylon 6. Y en lo que respecta al PVC sólo se recicla el proveniente de ventanas y envases. Esto último se debe a que el PVC es un plástico considerado “incómodo de reciclar” debido a que por su contenido de cloro los centros de acopio no lo reciben. (Malacara N. 2018)

Particularmente, en lo que respecta a los componentes de alfombras se ha realizado prácticamente un nulo trabajo en México. Esto es muy preocupante, principalmente si se considera que, de acuerdo con el (INEGI, 2017), en México existen 2272 unidades económicas dedicadas a la fabricación de alfombras y similares, lo cual equivale a 152 millones de pesos de producción bruta mensual. En el Estado de México y el Distrito Federal se concentra alrededor del 30% de esta producción con el consumo es superior al 55% de la producción nacional. Estas cifras permiten visualizar la magnitud de los desechos de estos productos que se generan en esta zona, una vez que termina su periodo natural de uso son simplemente sustituidos en edificios públicos, privados y hogares en general. A esto se le debe sumar las importaciones en este sector lo que equivale a 360 millones de metros cuadrados de alfombra. Aunado a ello, de acuerdo con Hannover Fairs México, en el presente año se tendrá un incremento de 3.5 a 4% en la industria de alfombras, con lo cual se espera que para finales de este año se hayan producido 385 millones de m² de este insumo. Este material será desechado al terminar su vida útil, que será en un periodo de 5 a 10 años, después de los cuales se deschararán aproximadamente 167,400 toneladas de residuos aproximadamente, considerando una densidad de 2.3kg/m² de alfombra. (AM Querétaro, 2018)

En México, a diferencia de E. U. y Europa, no existen políticas públicas ni un programa para el reciclado, recolección y reaprovechamiento de la alfombra; por consiguiente, no existe en el mercado nacional equipo y maquinaria o proceso para realizar el trabajo.

Atendiendo a esto, se realizó el análisis de sustentabilidad energética del proceso de reciclado del PVC de alfombra y se observó que es posible obtener una cantidad importante de materia prima, solamente de los servicios públicos municipales. En el apartado de factibilidad se aprecian datos específicos sobre los volúmenes de desechos que potencialmente se obtendrán para su procesamiento.

3. Materiales y Métodos

3.1. Metodología

Teniendo en cuenta los antecedentes presentados y dado que en México no existen empresas similares dedicadas al tratamiento de residuos de recubrimiento de suelo y alfombra. En el estudio que aquí se expone se realizó un análisis primeramente de la sustentabilidad energética de la producción del PVC virgen, esto con el fin de observar los consumos energéticos de este proceso y tener un punto de comparación para la propuesta que se presenta.

Posteriormente se realiza un análisis a grandes rasgos de los diferentes tratamientos que según algunos autores (Bird, 2014) se pueden dar a los residuos plásticos, esto para analizar el impacto ambiental que tendría cada una de estas propuestas; partiendo de ello se observó que de acuerdo al impacto ambiental y a las propuestas de organizaciones internacionales, la mejor opción es el reciclado del residuo de la alfombra (CRI, 2003).

Se analizaron los procesos existentes en otros países para realizar la separación y reprocesamiento de los componentes de la alfombra y con base en ello se propone la separación mecánica. La elección del procedimiento óptimo se realizó con base en la metodología de Norton (2006), considerando los factores más importantes para lograr una separación a bajo costo y con el menor consumo energético.

Por su parte el análisis de sustentabilidad se realiza basado en la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV), ésta es una técnica de gestión ambiental desarrollada para comprender y tratar los aspectos e impactos ambientales potenciales relativos a productos tanto manufacturados como consumidos (ISO, 2006).

El Ciclo de Vida de un producto involucra flujos de materia, energía y dinero a lo largo de su cadena de valor, no obstante, para tener un panorama completo se deben considerar los impactos de todos los actores: trabajadores, comunidades locales, consumidores y la sociedad en general involucrados con la producción y consumo del producto (UNEP, 2011). Sin embargo, un ACV puede realizarse principalmente en tres tipos de alcance: de cuna a tumba-incluye todas las fases del ciclo de vida del producto, de cuna a puerta –abarca de la extracción al final del ciclo de producción, y de puerta a puerta –de extracción hasta el producto terminado (García, et al., 2018)

En el presente documento se pretende analizar sólo la sustentabilidad energética del reciclado de materiales de la alfombra; por lo que no se realiza el ACV del proceso completo.

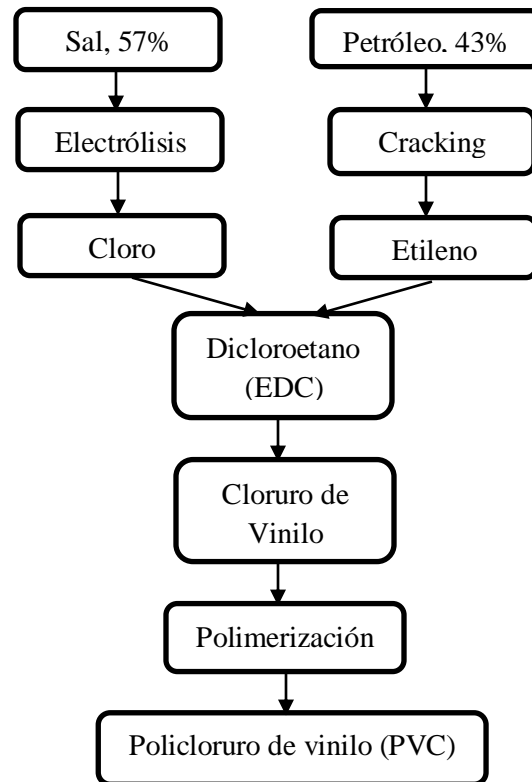
Los pasos descritos se describen en los subapartados siguientes.

3.2. Componentes y producción del PVC

Como se indicó anteriormente, un alto porcentaje del contenido de la alfombra lo representa el soporte el cual en su mayoría es PVC, por esta razón en este trabajo se presenta la propuesta del reciclado de PVC. El PVC es la resina sintética compleja y difícil de formular y procesar, pues requiere de un número importante de ingredientes y un balance preciso de éstos para poder transformarlo al producto final deseado. Es un material muy versátil; pues además de ser termoplástico, a partir de él se pueden obtener productos rígidos y flexibles. Entre sus principales aplicaciones están:

- Envases
- Perfil para ventana
- Pisos
- Recubrimientos
- Alfombras

Su proceso de producción es altamente contaminante y tiene un alto consumo energético. En la siguiente figura se describe su proceso de producción.

Figura 1.2 Proceso de fabricación del PVC

(Fuente: <http://www.aliplast.org/>)

Dado el proceso de producción de PVC virgen, se requiere un alto consumo energético para su producción, autores como L. Ye et. al (2017), realizan un análisis de ciclo de vida de la producción de este insumo plástico, considerando como unidad funcional la producción e 1 tonelada de PVC, los consumos energéticos y de agua que tiene este proceso de producción se presentan en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Consumos energéticos y de agua para la producción de 1 Ton de PVC virgen

Recurso		PVC Virgen
Agua desionizada	(Ton)	0.21
Agua	(kg)	5.48×10^3
Energía	(kWh)	165
Gas Natural	(m ³)	29.61
Desecho de alfombra	(Ton)	2.17

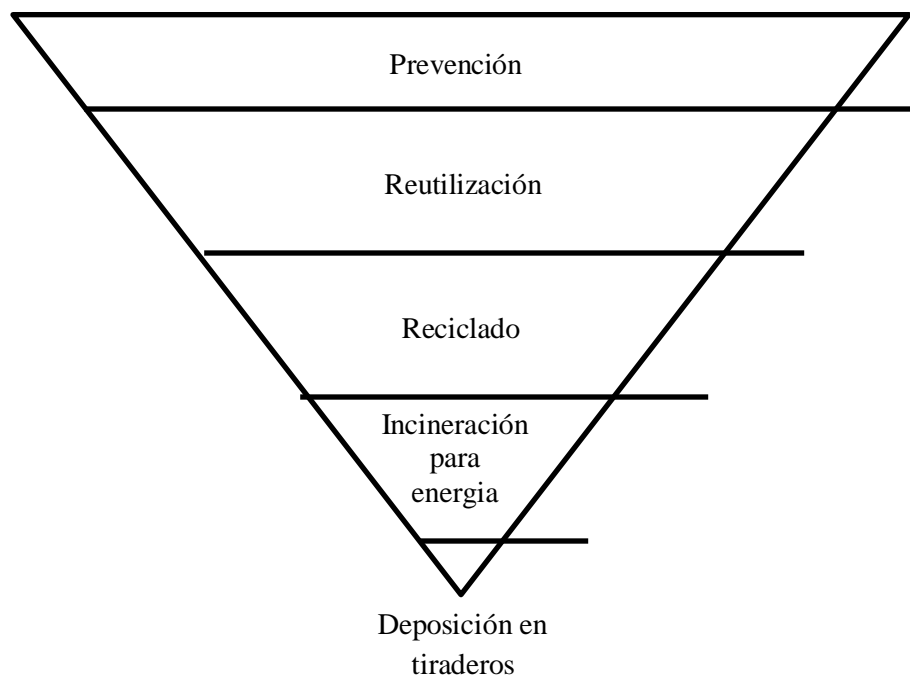
Fuente: L. Ye et. al (2016)

Este mismo autor indica que el potencial de calentamiento global de la producción de 1 tonelada de este insumo es 2.82×10^3 kg de CO₂ equivalente. Esto aunado a las emisiones de SO₂, Cl y HCl que también se presentan hace que sea un proceso poco sustentable y con un alto potencial de toxicidad hacia el medio ambiente.

3.3. Tipos de tratamiento de los residuos de la alfombra

De acuerdo con autores como Bird (2014) existe una jerarquía en el tratamiento de los residuos la cual se define según su grado de sustentabilidad. La figura 3 muestra esta jerarquía, de acuerdo con ella la prevención es la mejor opción para el manejo sustentable de estos residuos. Esto se logra con el uso de menos materiales vírgenes o materiales, degradables que no contengan residuos peligrosos, contemplando esto tanto en el diseño como en la manufactura del producto; esto también debe considerar diseños con mayor longevidad y en los cuales la separación de los materiales y, por lo tanto la deposición de los residuos sea sencilla, sin embargo, esto va en contra de muchas políticas adoptadas por la mayoría de las compañías hoy en día. Posterior en esta jerarquía se encuentra la reutilización, en la cual empresas como INTERFACE, promueven la reutilización de alfombras para albergues o escuelas marginadas. En seguida se encuentra el reciclado cuya factibilidad se muestra en el presente documento y finalmente la combustión para obtención de energía y a la deposición en los vertederos.

Figura 1.3 Jerarquía del manejo de los residuos



Fuente: Elaboración propia

El empleo de la alfombra como combustible tiene aplicación principalmente en hornos cementeros y calderas de lecho fluidizado. En general, los componentes de la alfombra, como el polipropileno, tienen un poder calorífico equiparable con el diésel, sin embargo, el problema de esta acción es que la generación de gases tóxicos como metales pesados, plomo, cadmio y cloruros, por lo que no se puede considerar una opción sustentable para el tratamiento de los desechos de las alfombras.

3.4. Reciclado de los residuos de alfombra

Como ya se indicó, el PVC es un material cuyo proceso de reciclado es difícil debido a su contenido de cloro, sin embargo, una medida sustentable para el tratamiento de los residuos de alfombra es su reprocesamiento. Dentro de este se encuentran los siguientes:

- a) **Reprocesado de la fibra.** Representa el 2% de las opciones actualmente empleadas para procesamiento de residuos de alfombras. Consiste en separar las distintas fibras, lo que se hace mediante la despolimerización, al sumergir la fibra en un solvente que causa la separación de las fibras de otros componentes plásticos. Este proceso permite recuperar el caprolactama (monómero del Nylon) para que sea polimerizado nuevamente y empleado en la producción de nuevas alfombras o en la industria automotriz. Este proceso también puede realizarse con vapor sobrecalentado a una temperatura entre 250 y 400 C. (Hopewell, et. al. 2009).
- b) **Reprocesamiento del material plástico.** Esto incluye la separación del soporte de PVC o SVR. Este proceso representa el 4% de las opciones de reciclado de alfombra, es económicamente rentable comparado con el reprocesamiento de la fibra, por su poca demanda de energía y materiales. Consiste en el calentamiento de la alfombra y la posterior separación mecánica una vez que el PVC ha perdido su estabilidad. Una vez separado el PVC se muele y puede aprovecharse casi en su totalidad en la fabricación de alfombra nueva, sin que este pierda sus propiedades.

Analizando los procesos antes descritos, con base en la metodología de Norton (2006) se observa que lo más factible económicamente es la recuperación del PVC porque implica menos procesos y no requiere un procedimiento químico, como es la despolimerización.

Así pues, el proceso de reciclado que aquí se propone consiste precisamente en el reprocesamiento del material plástico, en este no pretende separar estos componentes, ya que se trata de una separación mecánica para un posterior reúso de esta capa, mediante un proceso muy simple que se describe en el siguiente apartado.

3.5. Propuesta de proceso de reciclado de alfombra.

Como se mencionó anteriormente, el presente trabajo esta enmarcado en los resultados de un proyecto PEI-CONACYT, del cual una servidora fue responsable técnico. En este proyecto se firmó un contrato de confidencialidad por lo que no es posible dar detalles del proceso. Sin embargo se describe de manera general.

Es importante mencionar que aun cuando es el resultado de un proyecto específico de innovación, el presente documento muestra que es factible energéticamente llevar a cabo el procedimiento de separación mecánica de alfombra para el reciclado del PVC. El llevar a cabo este procedimiento de reciclado permitiría que cientos de toneladas de alfombra no llegaran a tiraderos, con el impacto ambiental que ello implica.

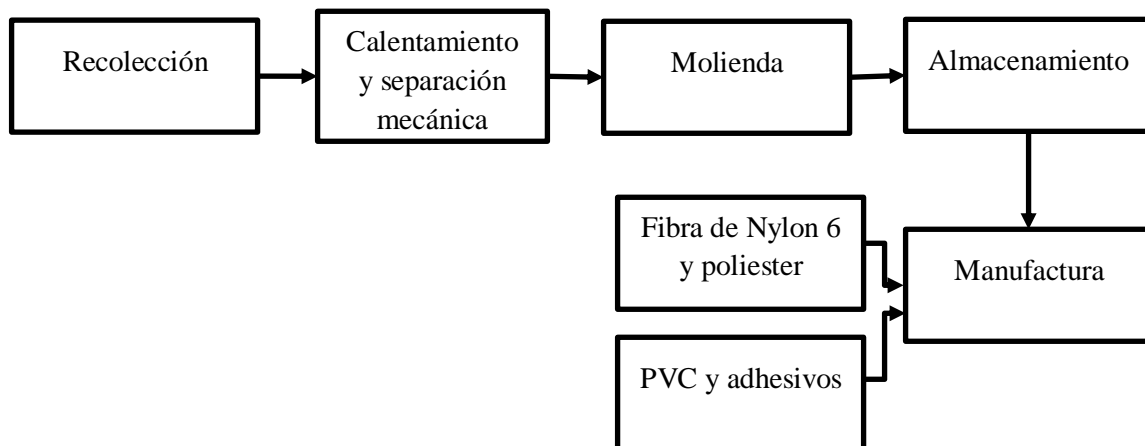
El procedimiento consiste en la separación de la capa posterior de la alfombra modular (backing) para ello es necesario calentar la alfombra a una temperatura aproximada de entre 90 y 100°C que corresponde a la temperatura de ablandamiento del PVC sin que este comience a degradarse y a emitir sustancias tóxicas, una vez que este ha reblandecido se procede a una separación manual y molienda del material.

De acuerdo a las pruebas realizadas en la misma empresa de 2.7 toneladas de alfombra es posible reciclar 1 tonelada de PVC que se empleará directamente para la capa posterior de la alfombra.

Una vez que se ha molido el PVC, este vuelve a integrarse al proceso de producción de alfombra sin ningún procedimiento adicional, solamente su fusión para su posterior aplicación a la fibra de vidrio.

En el proceso se considera la parte de la recolección de la alfombra desde el centro de acopio, para cuantificar el costo y la energía de esta parte del proceso se toma una distancia de 50km al centro de acopio. Es importante aclarar que no se considera el costo que conlleva el retirar la alfombra ya que este costo es intrínseco en ambos escenarios: con y sin reciclado.

Figura 1.4 Proceso propuesto para reciclado de PVC y soporte de alfombra modular



Fuente: Elaboración propia

3.6. Análisis de sustentabilidad del proceso de reciclado de alfombra

3.6.1. Unidad funcional

Se considera como una unidad funcional la producción de 1 tonelada de PVC a partir del reciclado de 2.7 toneladas de alfombra. Se realiza esto porque en el análisis del proceso se observó que para obtener 1 tonelada de PVC reciclado se deben procesar 2.7 toneladas de alfombra modular.

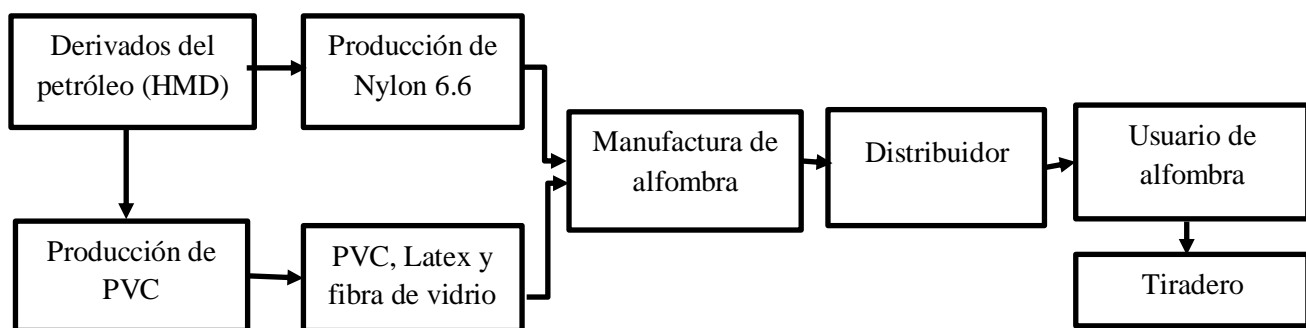
3.6.2. Análisis Funcional

En el presente trabajo se utiliza la metodología de análisis de ciclo de vida del proceso de producción de alfombra con PVC reciclado. El análisis de ciclo de vida consiste en un análisis de las etapas consecutivas que tiene un producto o un sistema, desde que es materia prima hasta que se adquiere para su uso y posteriormente se desecha. Es muy importante indicar que no se trata de una metodología estandarizada y no está completamente definida, sin embargo, es muy útil para obtener los flujos de energía, agua y materiales en cada etapa del proceso e determinar los potenciales que tendría la modificación del mismo o el manejo de un ciclo cerrado de producción (reciclado). (Heijungs, 2013). En este caso el análisis está enfocado únicamente en los consumos energéticos y las emisiones de CO₂.

Así pues, se realiza del proceso de producción de alfombra como actualmente se realiza en México, este se muestra en la figura 5. Puede observarse que se trata de una cadena de producción y disposición lineal, que la mayor parte de la materia prima proviene de derivados del petróleo y que el estado final del producto es su deposición en tiraderos. Este tipo de cadena lineal, en la cual no se considera el reciclado del producto y su disposición final es en un tiradero tiene un alto impacto ambiental.

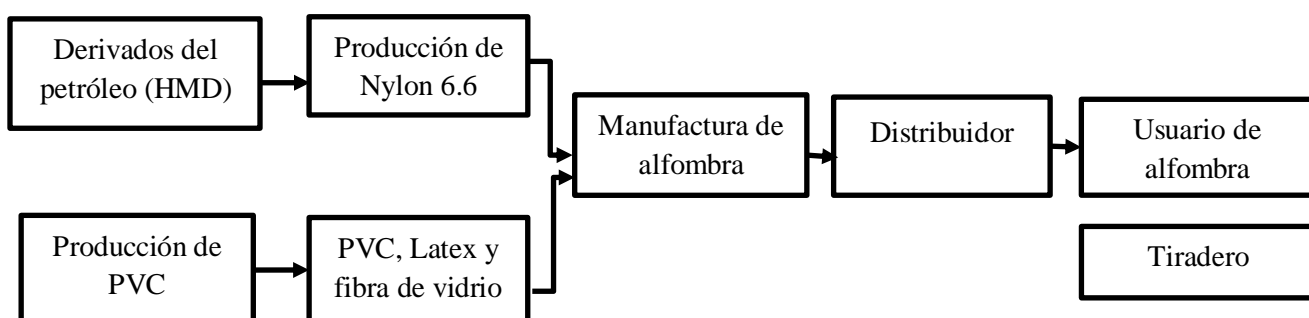
Por su parte en la figura 6 se el proceso propuesto considerando el reciclado del soporte de la alfombra modular, el cual está compuesto en su mayoría de PVC. Para este tipo de sistema es importante considerar la recolección, separación y reconstitución de la alfombra o materia prima, durante el proceso; esto implica la creación de redes de recolección de alfombra usada para su tratamiento, ya que una vez que esta llega a los tiraderos, resulta más difícil el tratamiento del residuo, tiene un mayor consumo energético y el proceso se vuelve menos sustentable.

Figura 1.5 Cadena de producción-disposición lineal de la producción de alfombra



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.6 Ciclo cerrado de producción de alfombra con reciclado de PVC

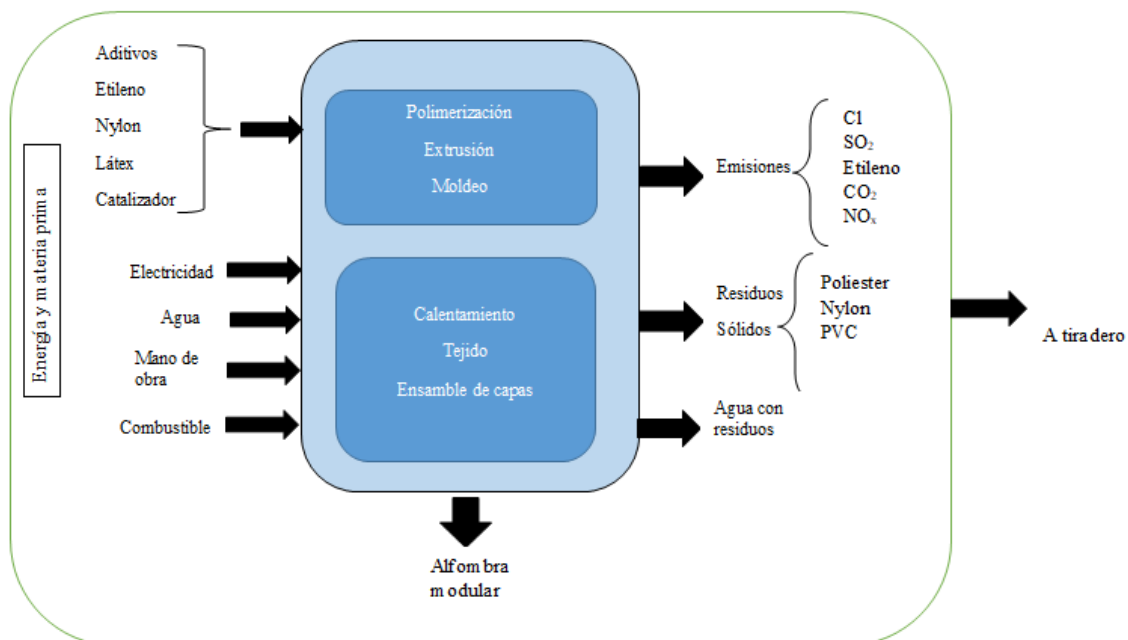


Fuente: Elaboración propia

Es importante señalar que si bien en la figura se muestra la recepción de Nylon y fibra de vidrio no se considera en el análisis su proceso de producción porque únicamente se está analizando la sustentabilidad del proceso de reciclado del soporte de PVC.

Asimismo, se realiza un análisis funcional como referencia para visualizar las entradas y salidas del proceso de producción de la alfombra, éste considera también los consumos de energía y agua durante el proceso. El análisis funcional se realizó tomando como referencia los resultados presentados por CARE (2015) se presenta en la figura 1.5.

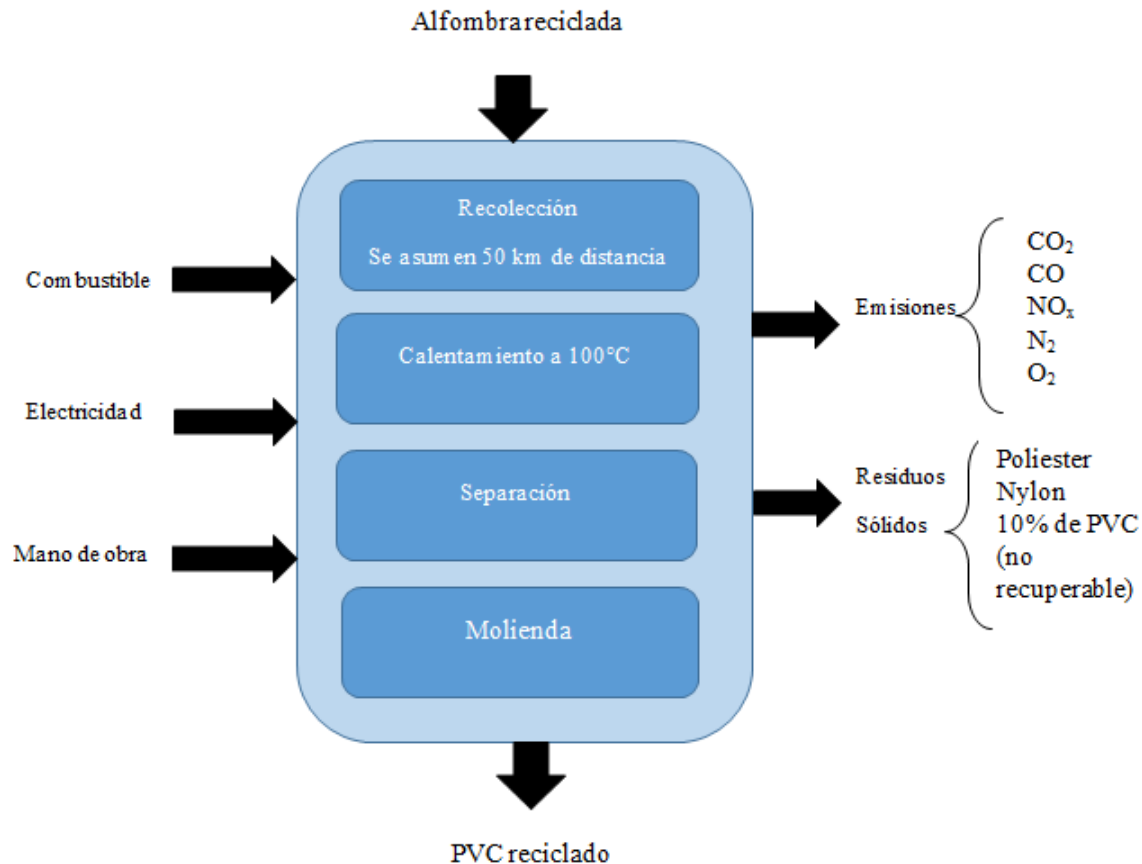
Figura 1.7 Análisis funcional de la fabricación de alfombra



Fuente: Elaboración propia

Se realiza el mismo análisis para la producción de 1 tonelada de PVC reciclado, con ello se determinan cuáles son los flujos más importantes durante el proceso y cuales tienen mayor impacto ambiental, en la figura 8 se muestra este análisis funcional y se compara con el de la producción de 1 tonelada de PVC virgen (fig. 5), esto último tomando como referencia el trabajo de L. Ye. et. al. (2016) quienes realizan el análisis de ciclo de vida de la producción de PVC y otros polímeros.

Por otro lado, para complementar los datos se realizó un análisis de los mayores consumos y emisiones que tiene el proceso de producción de alfombra, en este sentido WRAP (2013), indica que consumo de agua de para producción de alfombra se divide en mayor parte entre el consumo de agua para el criadero de las ovejas, cuando se usa lana natural, y la refrigeración para el proceso de extrusión de Nylon y polipropileno. Por su parte, el proceso que mayormente contribuye a la generación de huella de carbono es el de producción de hilo de Nylon y polipropileno. En cuanto al impacto durante la manufactura de la alfombra, el proceso que más consumo de agua tiene es el teñido, sin embargo este impacto puede reducirse de manera importante al reutilizar el agua posterior a un tratamiento.

Figura 1.8 Análisis funcional del proceso reciclado de alfombra

Fuente: Elaboración propia

4. Resultados

Considerando el consumo de energía y agua, así como la producción de desechos tóxicos, el reprocesamiento del PVC del soporte de la alfombra modular es la opción más sustentable de reciclado de residuos. Ya que no implica costos elevados ni requerimientos de maquinaria compleja. Considerando, que autores como Wrap (2013) indican que la alfombra tiene una densidad de 2.3 kg/m^2 y que el 46% de esta es material plástico, principalmente PVC, se puede decir que es factible recuperar 1.058 kg de PVC por cada m^2 de alfombra procesada, lo que representa un ahorro importante tanto de energía, agua y emisiones.

Derivado del proceso propuesto en el presente documento se realizó un análisis del consumo energético del equipo empleado en el proyecto para la producción de 1 tonelada de PVC reciclado. Para el cálculo del consumo energético se consideraron todos los sistemas de control, resistencias y banda transportadora que emplea el equipo diseñado para el proyecto. Asimismo, se consideró una distancia de 50 km, empleando un camión de tres toneladas, para la recolección de la alfombra. Estos resultados se muestran en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Consumo energético del proceso de reciclado de PVC de alfombra

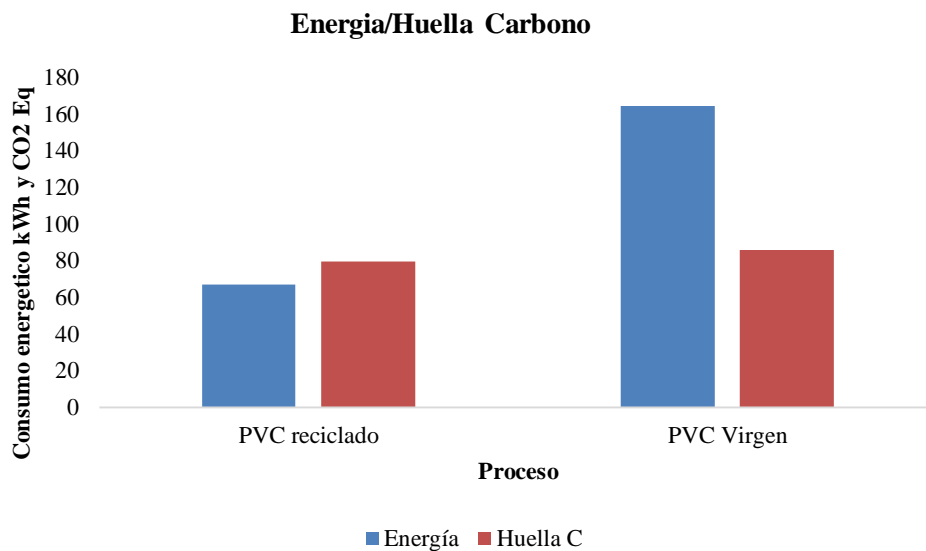
Parte del proceso	Consumo energético	Consumo de diesel
Horno	51 kWh	
Molienda	11 kWh	
Banda transportadora	5.54 kWh	
Transporte de la alfombra		250lt
Total	67.4 kWh	250lt

Fuente: Proyecto Conacyt PEI-2016

Para tener una perspectiva más clara del ahorro de energía que se tiene en el proceso, en la gráfica de la figura 1.9 se muestra un comparativo del consumo energético de 1 ton de PVC virgen y PVC reciclado de la alfombra modular.

En la misma gráfica se muestra también comparativo de la huella de carbono obtenida solamente por el consumo energético y el transporte del material (PVC y alfombra), considerando el desplazamiento indicado en la tabla 1.2. Para ello también se considera un desplazamiento para la recolección de alfombra que ira al tiradero.

Figura 1.9 Comparativa de consumo energético y huella de carbono derivada de éste entre el reciclado de PVC y la producción del mismo



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPRO ©

Se observa que la disminución del consumo energético es más de la mitad si se emplea PVC reciclado. Esto muestra el gran potencial que tiene este proceso, el cual es sumamente sencillo y solo implica una logística de recolección para evitar que la alfombra llegue a tiradero. En cuanto a la huella de carbono no se observa una disminución considerable porque se está tomando en cuenta el desplazamiento del material al centro de acopio. Sin embargo, es importante enfatizar que no se está analizando la huella de carbono del proceso completo de producción de PVC, la cual es considerablemente más alta.

Por otro lado, es muy importante tener en cuenta el consumo de petróleo que requiere la producción del PVC. El (MAMRM, 2013), indica que si se considera que el 43% de PVC es derivado de petróleo puro, se puede indicar que por cada tonelada de PVC producido se consumen 0.43 toneladas de petróleo.

Con lo anterior, aun considerando que el proceso de reciclado de PVC de alfombra tiene un consumo energético, tanto eléctrico, como térmico, este es mínimo, comparado con el proceso de producción de PVC virgen. Esto lo hace un proceso económicamente viable y sustentable desde el punto de vista energético.

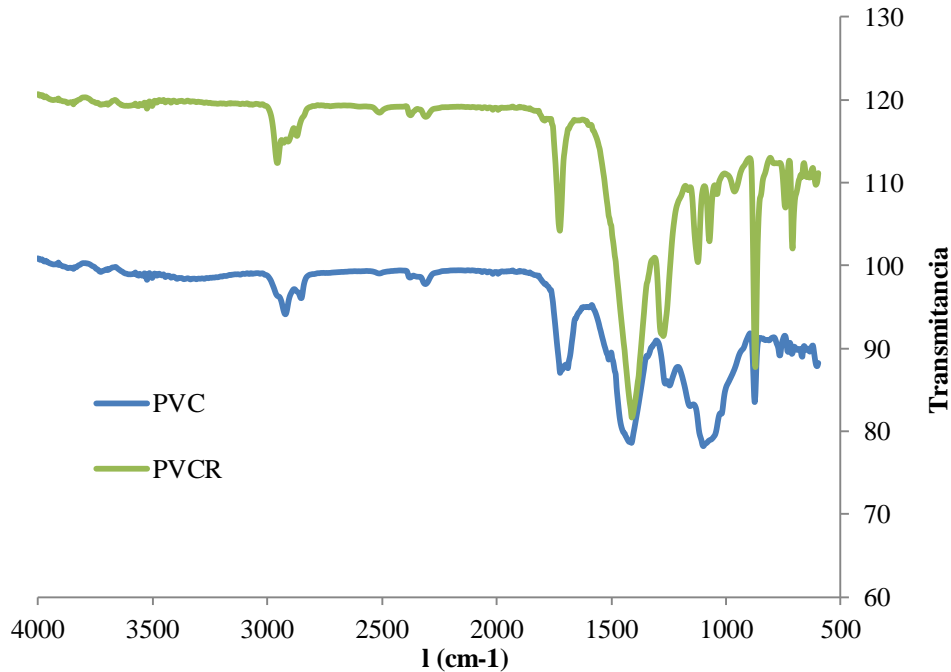
Ahora bien, durante el recorrido que se realizó con empresas del ramo en U.S. se indicó que la meta es emplear al menos el 50% del PVC reciclado, haciendo un análisis en este escenario. Considerando esto se observa que se disminuye notablemente la cantidad de backing requerido, lo que disminuye en un 50% el consumo de petróleo.

Finalmente, para comprobar la viabilidad final del proceso se analizaron muestras del soporte de PVC de la alfombra nueva, sin reciclar y el mismo reciclado más de dos ocasiones. Se analizaron a través de un FIR con el fin de observar si se alteraban los compuestos. Se realizó esto con el fin de determinar si existía alguna modificación en la estructura molecular del PVC y en sus propiedades. Estos resultados se muestran en la figura 1.10.

El espectro de IR del PVC coincide con el de la muestra de PVC reciclado (PVCR). La banda de absorción que se observa aproximadamente en 1700 cm⁻¹ corresponde al grupo carbonilo (C=O). Mientras que aproximadamente en 600-700 cm⁻¹ corresponde al grupo funcional C-Cl.

La absorción que se observa en 3000 cm^{-1} , corresponde a grupos (OH^-) que probablemente provenga de algún catalizador o de la humedad del medio, sin embargo también la absorción de C-H y este grupo funcional se observa en la estructura química. Esto indica que la muestra de PVC reciclado no ha sufrido modificaciones en su composición ni en sus propiedades.

Figura 1.10 FTIR de PVC reciclado y PVC virgen



Fuente: Elaboración propia

5. Conclusiones y Discusión

En el presente trabajo se muestra un análisis de la sustentabilidad energética del proceso de reciclado de alfombras, principalmente bajo el contexto del mercado nacional. Se realiza primeramente un análisis de las principales tendencias en cuanto a reciclado y producción de alfombras.

Se analizó que la mayoría de los componentes que actualmente tienen las alfombras no son biodegradables y son altamente contaminantes, por lo que no se recomienda su desecho en vertederos.

Se observa que en otros países, principalmente en U.S. U.K. y Alemania se tienen políticas claras que promueven el reciclaje y reutilización de residuos de las alfombras.

Se analizaron diversas acciones planteadas por las industrias manufactureras de alfombras y se muestra que de acuerdo con (CR UK, 2010), una tonelada de alfombra reciclada evita 4.2 toneladas de emisiones de CO_2 al ambiente.

En el caso de México, no existe aún una política que promueva la recolección y reciclado de los residuos de la alfombra, sin embargo, dado el problema de manejo de residuos es importante considerar los procesos de reciclado para evitar tener estos residuos no degradables en vertederos, ya que esto tiene un impacto ambiental muy alto.

Al analizar el consumo energético del proceso de reciclado del PVC del soporte de la alfombra modular este es menos de la mitad del requerido para la producción de este material virgen, lo cual hace energéticamente sustentable el proceso. Esto se debe en gran parte a que se trata de un proceso sencillo que solo implica calentamiento y separación mecánica. Este hecho apoya de manera importante a la economía circular, ya que ésta está basada en la reutilización de los propios materiales en el mismo proceso; esto fue un hecho muy reiterado en el “Vinil plus sustainability forum 2017” en donde se hace énfasis que particularmente el PVC es un material cuya fabricación tiene una huella de carbono importante (Vinilplus, 2017)

Por otro lado, es importante destacar que en el desarrollo del presente proyecto se observó que la loseta vinílica también tiene un alto porcentaje de PVC que tiene potencial para ser reciclado. Es preciso que en el País se desarrolle un proceso logístico de recolección de alfombra y recubrimientos de piso, ya que esto evita que estos residuos lleguen a los tiraderos y ya no puedan someterse a un proceso de reciclado.

Es imprescindible el desarrollo de políticas públicas que obliguen a las empresas productoras de alfombra y recubrimiento de piso a que empleen un porcentaje de material reciclado, como ocurre en US y UK, esto permitirá promover este tipo de técnicas, generará empleo y disminuye el gran impacto ambiental que este tipo de procesos tiene en el medio ambiente.

Agradecimientos

El presente artículo es resultado del proyecto PEI-CONACYT 2017 realizado en colaboración con la Universidad Autónoma del Estado de México y una empresa de reciclado de alfombras y pisos, establecida en el Estado de México. Dado que se firmó un convenio de confidencialidad hay datos que se omiten en el presente artículo.

Referencias

Aliplast (2018), Tecnología del Plástico, Vol. 22. Diciembre enero 2018.

Al-Salem, S., Lettieri P., Baeyens J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management* 29: 2625-2643.

AM Querétaro (2019), Industria de alfombras superará los 23 mil mdp en México, AM Querétaro Sección negocios, Recuperado el 5 de mayo de 2019 de: <https://amqueretaro.com/negocios/2019/03/31/industria-de-alfombras-superara-los-23-mil-mdp-en-mexico/>

Bird L.(2014) Carpet recycling UK conference. Recuperado el 8 de noviembre del 2017 de: http://www.carpetrecyclinguk.com/downloads/27_percent_landfil_diversion_how_the_UK_exceeded_its_targets

CARE, (2017), CARE 2017 Report, Recuperado el 8 de noviembre del 2017 de: <https://carpetrecovery.org/wp-content/uploads/2014/04/CARE-2017-Annual-Report-FINAL.pdf>

CR UK (2010). Carpet recycling UK, Carpet recycling and Government policy. 2010. Recuperado el 4 de abril del 2019 de http://www.carpetrecyclinguk.com/downloads/Carpet_Recycling_and_Government_Policy_Jan%202010.pdf.

CR (2013); Carpet Industry Sustainability, consultado el 8 de abril de 2019 de: <https://www.carpet-rug.org/About-CRI/CRI-Blog/October-2013/Carpet-Industry-Sustainability-Standard.aspx>

Fiksel, J., McDaniel J. Y Mendenhall C. (1999), Measuring progress towards sustainability principles, process, and best practices, Greening of Industry Network Conference Best Practice Proceedings, 278-291.

García, C. A., Zenón, E., Aguilar, P., Barahona, L. F., Sacramento, J. C., Navarro, F., . . . Morales, F. (2018). *Análisis de Ciclo de Vida de la Bioenergía en México*. Morelia: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).

Heijungs R., (2013), Settanni E. y Jeroen Guinée (2013); Toward a computational structure for life cycle sustainability analysis: unifying LCA and LCC; *Int J Life Cycle Assess* (18):1722–1733.

Hopewell J., Dvorak R, Kosior E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities, *Phil. Trans. R. Soc. B* (364), 2115–2126.

- INEGI (2014), La industria Textil y del Vestido en México 2014, Serie de estadísticas Sectoriales, INEGI-c2014, México.
- ISO. (2006). *ISO 14040:2006(es)*. Recuperado de International Organization for Standardization: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- Malacara N. (2018) El Problema de los Plásticos en México y el Futuro del Reciclaje. Alto nivel noticias, Recuperado el 25 de mayo del 2019 de: <https://www.altonivel.com.mx/empresas/aguas-con-los-plasticos/>
- MAMRM (2013). Reporte del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea; Documento Breef, 2013; Recuperado el 2 de mayo del 2019 de: <https://www.mapama.gob.es/>.
- Mihut C, Captain DK, Gadala-Maria F, Amiridis MD (2001). Review: recycling of nylon from carpet waste. *Polym Eng Sci* 2001;41:1457–70.
- Paolo F, Editor (2007). *Recycling of PVC and Mixed Plastic Waste*, Chem Tech Publishing, Canada, 19-26.
- Producción de Polímeros (2007), Serie Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC). España 2007.
- Realff, M. & Saunders M. (2005) School of Chemical Engineering, Georgia Tech Notes, 3032-0100. Consultado el 8 de enero del 2019 de <https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/10335/2nd%20-%2030%20realff.pdf>.
- The Carpet and Rug Institute (2003) THE CARPET PRIMER. 2003. Consultado el 5 de diciembre del 2017 de: http://www.carpet-rug.org/Documents/Publications/029_The_Carpet_Primer.aspx
- Sotayo A. , Green S., Turvey G. (2015). Carpet recycling: A review of recycled carpets for structural composites, *Environmental Technology & Innovation Volume 3*: 97–107
- UNEP. (2011). *Towards a Life Cycle Sustainability Assessment: Making Informed choices of products*. Paris: UNEP.
- United Nations Environment Program (2002), Gas emissions from waste disposal. Consultado el 6 de abril de 2019 de: http://www.grid.unep.ch/waste/html_file/42-43_climate_change.html.
- United States Environmental Protection Agency, Background Document for Life-Cycle Greenhouse Gas Emission Factors for Carpet and Personal Computers. 2003. Consultado el 6 de abril de 2019 de: http://www.epa.gov/climatechange/wycd/waste/downloads/CarpetPCReport_11_21.pdf.
- Vaidyanathan R, Singh RP, Ley T (2006) Recycled carpet materials for infrastructure applications. Oklahoma: Oklahoma Transportation Centre; 2013.^[1] Wang Y. Carpet recycling technologies. In: Wang Y, editor. *Recycling in textiles*. Cambridge: Woodhead Publishing; 2006a. p. 58–70.
- Vinilplus (2017) PVC Smart Material, Recuperado el 5 de Agosto del 2019 de: <https://vinylplus.eu/recycling/a-smart-material>
- WRAP (2013), Resource Efficiency in carpet and Yarn Manufacturing, WRAP, 2013. Consultado el 8 de enero de 2019 de: http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/WRAPRefurbishmentResourceEfficiencyCaseStudy_CarpetsCarbonWater_v7FINAL.pdf
- Wu, Y., Chen A., Bo L. Wang, Z. (2010) Life Cycle Assessment of regeneration process of waste polyvinyl chorine. *Res. Environ. Sci.* 23, 805-810.
- L. Ye, Qi C., Hong J. and Ma X. (2017), Life cycle assessment of polyvinyl chloride production and its recyclability in China, *Journal of Cleaner Production* (142), Part 4, 2965-2972.